



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

PROPUESTA DE LAS ETAPAS Y ELEMENTOS NECESARIOS A CONSIDERAR PARA EL USO DE PREFABRICADOS PESADOS DE HORMIGÓN EN LA CONSTRUCCIÓN EN FAENAS MINERAS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

MATIAS FELIPE TARI ZAMBRANO

PROFESOR GUÍA:
JORGE PULGAR ALLENDES

PROFESOR CO-GUÍA:
DAVID CAMPUSANO BROWN

COMISIÓN:
WILLIAM WRAGG LARCO

SANTIAGO DE CHILE
2023

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil
POR: Matias Felipe Tari Zambrano
FECHA: 2023
PROFESOR GUÍA: Jorge Pulgar Allendes

**PROPUESTA DE LAS ETAPAS Y ELEMENTOS NECESARIOS A CONSIDERAR
PARA EL USO DE PREFABRICADOS PESADOS DE HORMIGÓN EN LA
CONSTRUCCIÓN EN FAENAS MINERAS.**

La presente memoria de título tiene como objetivo proponer etapas y elementos necesarios que deben ser consideradas para el uso de prefabricados pesados de hormigón en la construcción en faenas mineras y de esta forma entregar una guía con las principales consideraciones para el uso de estos elementos.

Para esto se utiliza la experiencia del alumno trabajando durante un año y medio en megaproyecto de construcción en minería (inversión sobre US\$ 2500 millones), donde el uso de elementos prefabricados pesados de hormigón alcanzaba el 40% del total de los hormigones a utilizar. A esto se le suma al análisis y revisión de normativa vigente, y guías de buenas prácticas existentes a nivel mundial.

El trabajo analiza las etapas de fabricación, transporte y montaje de elementos prefabricados de hormigón en faenas mineras, revisando sus secuencias, principales características por etapa y entregando recomendaciones de buenas prácticas a considerar.

*Dedicada a mi madre, Ruth.
Sin ti nada hubiera sido posible.*

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres, Ruth y Santos, que siempre me han apoyado de forma incondicional y que sin ellos nada de esto hubiera sido posible.

A toda mi familia, mis abuelos y tíos, que cada vez que iba de visita a Los Ángeles tenían palabras de apoyo y buenos deseos en mi formación profesional.

A mis tías de Santiago, Maritza y Jenifer, que me ayudaron en ciertos periodos recibéndome en su casa.

A mi tío Alexis, que me abrió las puertas al mundo laboral y me permitió ganar experiencia e inspirarme a escribir esta memoria.

A mis amigos, José y Felipe, que se volvieron familia en esas interminables sesiones de estudio de plan común y almuerzos en la universidad.

A mi profesor guía, Jorge Pulgar, por su apoyo y comprensión desde el primer momento en el desarrollo de este trabajo de título, y por permitirme realizar un trabajo más bien práctico, orientado a lo que quiero realizar en mi vida profesional.

A mis profesores co-guía e integrante, por su experiencia, tiempo y voluntad en integrar la comisión de esta memoria.

A todas las personas que me han apoyado y aportado en esta etapa de mi vida, que han sido muchas, ha sido un camino largo y difícil, sin ustedes no habría sido posible.

Finalmente, agradecerme a mí mismo, por nunca rendirme y siempre buscar ser una mejor persona. Gracias a esto estoy cada vez más cerca de ser el primer profesional de toda mi familia.

Tabla de contenido

1. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes generales.....	1
1.2. Objetivos.....	3
1.2.1. Objetivo general.....	3
1.2.2. Objetivos específicos.....	3
1.3. Metodología.....	3
2. Marco conceptual.....	4
2.1. Elementos prefabricados de hormigón en minería.....	4
2.1.1. Tipos de prefabricados en minería.....	6
2.1.2. Tipos de uniones para prefabricados de hormigón en minería.....	12
2.1.3. Secuencia en proyectos con prefabricados de hormigón.....	13
3. Desarrollo.....	16
3.1. Fabricación de elementos prefabricados pesados.....	16
3.1.1. Moldajes.....	16
3.1.2. Producción de prefabricados.....	20
3.2. Transporte de elementos prefabricados pesados.....	31
3.2.1. Logística eficiente.....	31
3.2.2. Transporte.....	33
3.2.3. Tipos de transporte.....	34
3.2.4. Autorización para transporte de cargas pesadas y/o sobredimensionadas.....	39
3.2.5. Consideraciones para transporte de prefabricados pesados.....	42
3.3. Montaje de elementos prefabricados.....	43
3.3.1. Equipos de izaje utilizados para montaje de prefabricados pesados.....	43
3.3.2. Procedimiento de montaje.....	46
4. Conclusiones y comentarios.....	52
5. Bibliografía.....	54

Índice de Tablas

Tabla 1: Secuencias de actividades para el desarrollo de un proyecto con elementos prefabricados de hormigón.....	14
Tabla 2: Límites de peso para camión con semirremolque con eje posterior simple o doble	40

Índice de Figuras

Figura 1: Izaje de prefabricado pesado de hormigón en minería.	5
Figura 2: Diagrama de horas requeridas según tipo de elemento.	6
Figura 3: Cajón prefabricado y sección típica.	7
Figura 4: Acopio y montaje de elementos prefabricados tipo 2.....	8
Figura 5: Elemento prefabricado tipo 3 en faena con TAG indicado (tomada por alumno).	9
Figura 6: Losa de fundación con prefabricados tipo 3 para sala eléctrica (tomada por alumno).	10
Figura 7: Conexión viga-columna, mediante ménsula, de elementos con unión tipo 4.	11
Figura 8: Moldajes según distintas materialidades.....	17
Figura 9: Sistema automatizado en la soldadura de moldajes.....	18
Figura 10: Mesa hidráulica basculante.....	18
Figura 11: Sistema de mesas moldaje.	19
Figura 12: Moldajes con puntos de izaje.	19
Figura 13: Elementos guía para insertos.....	19
Figura 14: Secuencia de actividades generales a considerar en fabricación de elementos prefabricados pesados de hormigón.....	21
Figura 15: Limpieza de moldajes.....	21
Figura 16: Aplicación de desmoldante en superficie interior de moldajes.	22
Figura 17: Paquetes de barras y rollos de acero.....	23
Figura 18: Modelo 3D de enfierradura para fundación prefabricada.....	23
Figura 19: Distintos tipos de separadores para hormigón armado.....	24
Figura 20: Fundación prefabricada con sistema de insertos con pernos (tomada por alumno).	25
Figura 21: Sistema de izaje temporal con torones en prefabricados pesados de hormigón (tomada por alumno).....	25
Figura 22: Perno de izaje galvanizado y tapa de reservaciones para izaje.	26
Figura 23: Medición de trabajabilidad del hormigón.....	27
Figura 24: Ejemplo de hormigonado directo en planta prefabricadora.	28

Figura 25: Terminación manual de superficie de hormigón.	29
Figura 26: Acopio de dovelas prefabricadas.	30
Figura 27: Secuencia de actividades generales a considerar en el transporte de prefabricados pesados de hormigón.....	32
Figura 28: Descarga de elemento prefabricado pesado de hormigón en faena minera con espacio reducido (tomada por alumno).....	33
Figura 29: Camiones rampla plana cargados con elemento prefabricado (tomadas por alumno).	35
Figura 30: Funcionamiento de cuello desmontable en cama baja.	36
Figura 31: Cama baja cargada con elemento prefabricado (tomada por alumno).	36
Figura 32: Transporte especial de prefabricados pesados de hormigón.	37
Figura 33: Rampas especiales para el transporte de elementos prefabricados pesados.....	37
Figura 34: Transporte de viga prefabricada sobredimensionada.	38
Figura 35: Peso máximo por eje o conjunto de ejes. (DS MOP N°158 de 1980).40	
Figura 36: Montaje de muro prefabricado de 75 toneladas (tomada por alumno).	44
Figura 37: Montaje de muro prefabricado de 35 toneladas (tomadas por alumno).	45
Figura 38: Almohadilla para estabilizador de grúa.	45
Figura 39: Corte de punto de izaje luego de montaje (tomada por alumno).	47
Figura 40: Secuencia de actividades a considerar para montaje de prefabricados pesados.....	47
Figura 41: Diferentes configuraciones según el izaje de la misma pieza prefabricada. (Ver montaje en Figura 37).....	48
Figura 42: Ejemplo de vista en planta con gálibo de la maniobra.....	49
Figura 43: Instalación de placa de nivelación para cajón prefabricado. (tomada por alumno).....	50
Figura 44: Verificaciones de nivel en montaje.....	51
Figura 45: Etapas generales para un elemento prefabricado pesado.	52

1. Introducción

1.1. Antecedentes generales

Es imposible pensar en Chile sin imaginar una cosa, productor de cobre, y es que Chile posee varios galardones en cuanto al preciado mineral: Es el país que más cobre produce en el mundo, es el país que posee las dos minas de cobre más grandes del mundo, Minera Escondida, ubicada en la Región de Antofagasta y Minera Collahuasi, que se ubica en la Región de Tarapacá, es el país con las mayores reservas de cobre, alcanzando el 23% a nivel mundial al 2020 y además, Chile posee la mayor empresa minera del mundo que es Codelco. (Copper Alliance, 2021)

Bajo el contexto anterior, la industria minera Chilena se encuentra en constante crecimiento en búsqueda de una mayor capacidad de extracción y procesamiento de mineral. Para lograr lo anterior se requiere un avance en los métodos y técnicas constructivas que permitan desarrollar estas nuevas plantas o ampliaciones de la forma más rápida, eficiente y con los más altos estándares de calidad.

Los proyectos de construcción a desarrollar para la industria minera poseen un enfoque especial. Y no solo por las características de los proyectos, que poseen estándares de calidad superiores a los de cualquier otra industria, sino también por la incidencia que tiene la minería en el desarrollo tecnológico y económico del país. Por lo anterior, retrasos en proyectos no solo afectan a la producción de la empresa minera si no también al desarrollo del país.

Un elemento esencial en el desarrollo de obras de construcción es el hormigón armado, solución que es y ha sido ampliamente adoptada para el desarrollo de infraestructura minera, pero que sin embargo, presenta varias dificultades que no se pueden obviar.

Algunos ejemplos de esto es la contaminación generada por los desechos o excedentes en faenas de hormigonado, la dificultad que impone el clima para el curado del hormigón, los elevados costos que genera llevar mano de obra a faenas mineras, entre otros. Se debe tener siempre en mente que las faenas mineras, en general, se llevan a cabo en lugares cordilleranos, a grandes alturas geográficas y alejados de la población.

De esta forma los elementos prefabricados de hormigón se presentan como una gran solución a lo que necesita la industria. Sin embargo, la inclusión de prefabricados de hormigón a grandes proyectos mineros parecía estar reservada para elementos de menor tamaño o un porcentaje menor hasta hace un par de años.

Debido al avance tecnológico en la industria de prefabricados de hormigón y a la industrialización de los procesos es posible reconocer múltiples ventajas en comparación a la solución *in situ*, estas ventajas, que serán enlistadas en el desarrollo del presente documento resultan en: *Mayor eficiencia en el uso de recursos y mayor control de la calidad.*

Desde enero del 2021 hasta marzo del 2022 el autor de esta memoria trabajó para una de la empresa de ingeniería más grande del mundo, en la construcción de un megaproyecto de infraestructura para una importante operación minera de Chile, siendo el presupuesto de este proyecto más de US\$ 2500 millones.

Durante esta experiencia laboral fue posible notar que el hormigón prefabricado representaba el 40% del total de hormigones considerados para el proyecto. Al recopilar información entre el personal de ingeniería con largas trayectorias se manifiesta que es el primer proyecto donde se utilizan en tal cantidad e importancia los elementos prefabricados de hormigón.

Otro elemento relevante es que debido a los grandes volúmenes manejados en la industria minera el tamaño de los prefabricados utilizados genera elementos de gran peso, llegando el prefabricado más pesado del proyecto a 75 toneladas.

En vista de lo ya mencionado y la clara dirección que está tomando el desarrollo de proyectos para la minería, migrando de la solución *in situ* a los elementos prefabricados de hormigón, es que nace la motivación de desarrollar esta memoria de título, como un documento que sirva de guía para introducirse en el uso de prefabricados pesados de hormigón en la construcción en faenas mineras.

Para lograr esta propuesta se analiza el proceso constructivo y los equipos necesarios para la utilización de elementos prefabricados de hormigón. Pasando por las secuencias típica, equipos y buenas prácticas a considerar en el uso de prefabricados de hormigón.

Debido a que se analiza el proceso constructivo se consideran las siguientes etapas: fabricación, transporte y montaje de prefabricados pesados de hormigón. El diseño de estos elementos (prefabricados pesados) no es parte de este trabajo de título.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Proponer etapas y elementos necesarios a considerar para el uso de elementos prefabricados pesados de hormigón en la construcción de faenas mineras.

1.2.2. Objetivos específicos

- Analizar el proceso y equipos necesarios para la de elaboración de elementos prefabricados pesados de hormigón.
- Analizar el proceso y equipos necesarios para el transporte de elementos prefabricados pesados de hormigón.
- Analizar el proceso y equipos necesarios para el montaje de prefabricados pesados de hormigón.
- Analizar a modo de ejemplo experiencia del alumno en faena minera en el uso de prefabricados pesados de hormigón y así comprender las implicancias del uso de estos y su conveniencia versus el hormigonado *in situ*.

1.3. Metodología

Para lograr el cumplimiento de los objetivos propuestos se establece la siguiente metodología de trabajo:

- Recopilación de bibliografía y definiciones pertinentes a los prefabricados pesados de hormigón y sus uniones.
- Estudio de normativa y especificaciones que aplican en Chile en fabricación, transporte y montaje de prefabricados pesados de hormigón.
- Análisis de secuencia en el uso de elementos prefabricados pesados de hormigón en faenas mineras.
- Análisis de tecnologías y técnicas para las etapas de fabricación, transporte y montaje de prefabricados pesados de hormigón.
- Uso de experiencia del alumno trabajando más de 1 año en construcción de megaproyecto con prefabricados pesados de hormigón en minería.

2. Marco conceptual.

2.1. Elementos prefabricados de hormigón en minería.

El hormigón armado es el material por excelencia para la construcción de proyectos de infraestructura para la minería, siendo la solución *in situ* la más utilizada, dejando un bajo porcentaje de las obras para elementos prefabricados. Sin embargo, desde hace ya un par de años, los elementos prefabricados están tomando mayor relevancia siendo incluidos como solución desde etapas tempranas en los diseños de los proyectos.

Grandes empresas mineras como Codelco están exigiendo la inclusión de estos en las etapas tempranas de ingeniería y diseño. Lo anterior se ha visto fuertemente influenciado por el avance de la tecnología e industrialización de los procesos en empresas dedicadas a la fabricación de prefabricados de hormigón. Lo que a su vez permite el desarrollo de piezas de mayores dimensiones y peso.

El uso de elementos prefabricados de hormigón entrega múltiples beneficios en comparación a la solución *in situ*, resultando en aumento de calidad y rendimiento en las etapas de obras civiles. Los elementos prefabricados permiten obtener beneficios en los *niveles de seguridad, tiempos de ejecución, calidad del producto y costos.*

Debido a que, al utilizar elementos prefabricados, se trasladan las faenas de hormigonado desde terreno a una planta con líneas de producción bien definidas y en ambientes controlados, se disminuye la cantidad de variables que pueden generar un riesgo para la integridad del personal, resultando en un aumento en los *niveles de seguridad.*

A su vez, al realizar la colocación del hormigón en una planta se puede obtener una importante *disminución de los tiempos de ejecución* de las obras, pues esto permite llevar a cabo actividades de forma simultánea, que si se hicieran de la forma tradicional sería imposible. Por ejemplo, es posible llevar a cabo la instalación de moldajes, enfierradura y hormigonado mientras que en terreno se están haciendo las excavaciones para llegar a la cota requerida. En cambio, si se siguiese la forma tradicional sería imposible hormigonar o instalar la enfierradura a la misma vez que se está realizando la excavación.

Además, al trasladar las faenas de hormigonado a plantas se puede obtener un proceso industrializado y secuencial, que permite llevar a cabo el proceso de hormigonado y curado, en un menor tiempo. De igual forma, los tiempos de trabajo en terreno se ven ampliamente disminuidos, pues no es necesario esperar en obra que el hormigón alcance sus resistencias de desmolde, pudiendo avanzar rápidamente entre el montaje de una y otra pieza.

Al fabricar estas piezas en plantas con líneas de producción bien definidas y controlando las condiciones climáticas como la temperatura y la humedad, se reducen los efectos negativos de elaboración asociado al hormigonado y/o a la mano de obra, como por ejemplo, mal vibrado o una altura de caída inadecuada en el momento del hormigonado. La reducción de variables que puedan afectar la colocación del hormigón se

traduce en hormigones más duraderos, con mejores acabados, mayor seguridad y cumplimiento de las especificaciones técnicas. Es decir, un hormigón de mayor de *calidad*.

Sumado a los puntos mencionados en los párrafos anteriores, la utilización de hormigones prefabricados puede permitir una disminución en *costos*, pues se tiene un menor desperdicio de material (ya sea en hormigón, enfierradura o moldajes), se requiere una menor cantidad de mano de obra y más importante aún, se requiere una menor cantidad de mano de obra en terreno.

De forma general las operaciones mineras se encuentran ubicadas en zonas muy alejadas de las ciudades, mayormente ubicadas entre la cordillera, es por esto que llevar mano de obra a estas zonas resulta costoso, generando gastos de transporte, construcción de campamentos y alimentación. En ocasiones, el costo de tener a una persona en terreno es mayor al costo a pagar por su sueldo, incluso el valor de tenerlo en terreno puede ser el doble al pagado por concepto de sueldo. Es por esto que la utilización de prefabricados de hormigón resulta beneficiosa, pues entre otras cosas, permite cambiar los grandes equipos de obras civiles (albañiles, enfierradores, carpinteros, etc.) por un equipo de menor tamaño, especializado en montajes.



Figura 1: Izaje de prefabricado pesado de hormigón en minería.

2.1.1. Tipos de prefabricados en minería.

Para lograr una incorporación eficiente del uso de elementos prefabricados de hormigón es necesario establecer clasificaciones o categorías donde se agrupen los distintos tipos de elementos, esta clasificación será útil para diferenciar los usos y complejidades de los prefabricados.

Para llevar a cabo esta clasificación se adopta la tipología utilizada por Codelco para definir los distintos grupos de elementos prefabricados. Esta clasificación abarca desde elementos estándar hasta elementos especiales y de mayor complejidad. Con esta clasificación se busca optimizar la gestión de los proyectos y elementos según el nivel de complejidad.

La clasificación consta de cuatro tipos de elementos, partiendo desde los elementos más básicos en el tipo 1, y llegando a los más complejos en el tipo 4. En la Figura 2 se presenta un diagrama con la relación entre las horas de diseño y la complejidad y peso del elemento.



Figura 2: Diagrama de horas requeridas según tipo de elemento. (Codelco)

A continuación se presentan los cuatro tipos para la clasificación de los elementos prefabricados de hormigón en minería.

2.1.1.1. Tipo 1: Prefabricados de catalogo o estándar.

Los elementos prefabricados tipo 1 o estándar reciben este nombre pues es posible encontrarlos en grandes volúmenes en el mercado nacional y con pronta entrega. Su fabricación se realiza, generalmente, en plantas automatizadas y equipos que permiten precisiones milimétricas. Sus especificaciones se encuentran regidas por normativas,

manuales y ordenanzas, lo que permite tener elementos similares de distintos fabricantes.

De forma general estos elementos no alcanzan más de 5 toneladas de peso y por ende, su izaje se realiza con equipos estándar (grúa horquilla, camión pluma, etc.). Es necesario destacar que estos elementos se encuentran en el mercado de forma estandarizada y no responden a un diseño particular para algún proyecto.

Debido al alto volumen en que se fabrican es posible encontrar stock en la mayoría de los casos, lo que permite una mayor certeza para la planificación de entregas. Dentro de la industria minera es posible encontrarlos en elementos como:

- Bancos de ductos
- Canaletas/cajones de cables

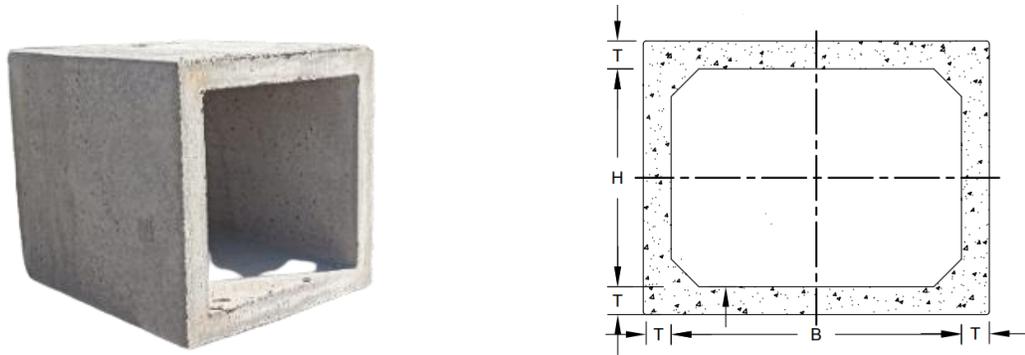


Figura 3: Cajón prefabricado y sección típica.

En la normativa vigente existen disposiciones que no están alineadas en términos de diseño y materialidad de los elementos. Por ejemplo, los cajones presentados en la Figura 3 han sido incluidos recientemente en el Manual de Carreteras (Vol. 4), es por esto, que se recomienda tener presente los siguientes puntos para resolver discrepancias:

- Diseñar con el método LFRD (Factores de Diseño de Carga y Resistencia) en lugar del método ASD (Allowable Stress Design), pues el método LFRD es más conservador para diseños donde las cargas muertas son menores a las cargas vivas. Cabe destacar que el método LFRD es tendencia en proyectos de la gran minería, el MOP y la ingeniería mundial.
- Generar una memoria de cálculo por cada fabricante, pues está debe adaptarse y personalizarse según las secciones de moldajes disponibles por parte del fabricante.

2.1.1.2. Tipo 2: Prefabricados sin uniones

Los elementos prefabricados tipo 2 o sin uniones, corresponden tal como su nombre lo indica a hormigones prefabricados que no generan uniones entre las piezas y por lo tanto no transmiten cargas a otros elementos estructurales circundantes. Su diseño se

realiza según las necesidades de cada proyecto, sin embargo, para un mismo proyecto pueden ser estandarizados y producidos de forma industrial.

Su producción se suele llevar a cabo en fábricas que se encuentran fuera de la faena. Sus dimensiones son tal, que es posible transportarlas en camiones rampla plana o cama baja sin escoltas y su peso no sobrepasa las 25 toneladas. De forma referencial y para ser transportadas en camiones con rampla plana o cama baja sus dimensiones deben ser tal que lo permitan. Se pueden considerar los siguientes valores como referencias de dimensiones máximas: 12 [m] x 2,6 [m] x 2,5 [m] (Largo x Alto x Ancho).

Como sus uniones no transmiten cargas estructurales, es común que estas sean uniones a tope y/o con machihembrado. Dentro de la industria minera es posible encontrarlos en múltiples productos, a continuación se presenta un listado con algunos de estos:

- Losas industriales.
- Trincheras eléctricas.
- Muros de separación.
- Canaletas de concentrado.
- Durmientes
- Fosos recolectores.

En la Figura 4 se puede ver el acopio y montaje de losas industriales.



Figura 4: Acopio y montaje de elementos prefabricados tipo 2.

2.1.1.3. Tipo 3: Prefabricados con uniones húmedas

Los prefabricados tipo 3 o con uniones húmedas son elementos con acero de refuerzo a la vista, es decir, este no está embebido en el hormigón. Este acero de refuerzo se deja a la vista para que en faena se puedan generar uniones monolíticas con los demás elementos. El diseño de estos elementos se realiza de forma única para cada

proyecto, y sus dimensiones o peso no tienen más límites que los impuestos naturalmente por la logística de transporte e izaje.

La unión de los elementos tipo 3 se logran mediante enfierradura y hormigón, que como se dijo anteriormente, se instalan en faena. Este tipo de unión permite prefabricar el 85% del hormigón a utilizar, mientras que el otro 15% se debe colocar en faena para lograr las uniones húmedas. Se busca que la unión húmeda de elementos prefabricados se comporte como una estructura construida en su totalidad in situ y de esta forma aprovechar las ventajas constructivas de los prefabricados y las ventajas de resistencia sísmica de una estructura hormigonada in situ.

La producción de estos elementos debe considerar pruebas de posición en planta, esto para asegurar que la enfierradura se traslape de forma correcta y así evitar problemas en la instalación y calce de estos cuando el elemento ya se encuentre en obra.

Estos elementos son diseñados calculando su resistencia de forma individual (elemento por elemento) y de la estructura en su totalidad. Para su montaje en faena se deben generar planos que entreguen todos los detalles de su armado y posicionamiento, indicando claramente el TAG (identificación BIM del prefabricado) de cada elemento, puntos de izaje, insertos, consideraciones para el hormigón in situ, detalles de enfierradura, etc. En la Figura 5 es posible observar un elemento prefabricado pesado de hormigón en faena minera, indicando ubicación (Molienda), ejes donde corresponde su instalación (D-E), TAG (F42A) y el peso de la pieza (43 toneladas).



Figura 5: Elemento prefabricado tipo 3 en faena con TAG indicado (tomada por alumno).

Dentro de la industria minera es posible encontrar algunos de los siguientes elementos prefabricados tipo 3:

- Fundaciones de: Salas eléctricas, edificios de molienda, pipe rack, equipos.
- Espesadores circulares.
- Túnel de: Emergencias, servicio, recuperación.
- Sedimentadores.
- Muros de contención.
- Estanque de: Alimentación, neutralización, retrolavado.



Figura 6: Losa de fundación con prefabricados tipo 3 para sala eléctrica (tomada por alumno).

2.1.1.4. Tipo 4: Prefabricados con uniones secas

Los prefabricados tipo 4 o con uniones secas se diferencian del tipo 3 en que no necesitan vaciado de hormigón en obra, lo que permite disminuir aún más la necesidad de mano de obra en faena. Al igual que el tipo 3 el diseño de estos elementos se realiza de forma única para cada proyecto, y sus dimensiones o peso no tienen más límites que los impuestos naturalmente por la logística de transporte e izaje.

Estos prefabricados nacen con la idea de generar estructuras modulares, reutilizables y desmontables. Sus uniones pueden ir desde conexiones machihembrado y pernos hasta soluciones más complejas como postensado en obra. Las uniones secas deben considerar el uso de otros materiales como ménsulas, placas de acero, insertos, etc.

Su principal uso es en proyectos que requieran una rápida ejecución, pues no requieren de hormigón in situ o también en obras con una vida de uso definida (5-10-15-20 años), pues un correcto diseño permite que este tipo de elementos sea desmontado con técnicas no destructivas y reutilizado en otro proyecto.

Es importante que el diseño y en especial los planos, incorporen claramente las dimensiones, puntos de anclaje, centro de gravedad de las estructuras, pues por sus características la estructura puede ser desmontada y montada nuevamente. A continuación se presenta un listado de algunos de los elementos tipo 4 que es posible encontrar en la industria minera:

- Columnas.
- Costaneras de: revestimiento, techo.
- Desaladoras.
- Arcos – Dovelas.
- Naves: Industriales, de bodegas y talleres.
- Vigas: Portantes, de rigidez.
- Fundaciones con postensados.
- Losas pretensadas.
- Estructuras mixtas: Acero con hormigones prefabricados.



Figura 7: Conexión viga-columna, mediante ménsula, de elementos con unión tipo 4.

2.1.2. Tipos de uniones para prefabricados de hormigón en minería.

La unión de los elementos prefabricados es uno de los puntos más críticos para la implementación de esta solución constructiva, es por esto que para comprender de mejor forma como se logran las uniones en elementos prefabricados de hormigón en minería, se presenta a continuación un listado, acompañado de una descripción de los tipos de uniones más comunes para dichos elementos.

Uniones secas

Las uniones secas se destacan por no tener la necesidad de vaciado de hormigón in situ y tampoco necesitar la instalación de enfierradura en el sitio de construcción. Sin embargo, se requiere utilizar elementos que puedan otorgar la fuerza suficiente para que las uniones puedan resistir y transmitir las cargas de la estructura. Estas uniones se pueden lograr mediante pernos, insertos, ménsulas, etc.

Uniones húmedas

Las uniones húmedas buscan obtener la misma resistencia y rigidez de una estructura monolítica hormigonada completamente in situ, combinada con los beneficios del uso de estructuras prefabricadas. Las uniones húmedas requieren la colocación de enfierradura y hormigonado en obra. De forma referencial se tiene que la relación de trabajo es 15% in situ y 85% en la planta de producción.

Para el diseño de las uniones y para obtener un largo de desarrollo adecuado de la enfierradura se puede utilizar el capítulo 25 de la ACI318-19. En este capítulo se revisan los detalles de la armadura y en especial los largos de desarrollo necesarios para que el refuerzo pueda lograr una transmisión de esfuerzos similar a una estructura realizada in situ.

Uniones con ménsulas.

La norma ACI318-2019, en el capítulo 16.5 define las ménsulas como voladizos cortos que tienden a actuar como cerchas simples o vigas de gran altura, las que se diseñan para esfuerzo cortante. Las uniones con ménsulas se utilizan para generar soportes temporales o permanentes entre elementos prefabricados que posteriormente tendrán una conexión del tipo 3 (húmeda) o del tipo 4 (seca). El diseño de estas se puede revisar en el capítulo ya mencionado de la norma ACI318-19.

Uniones a tope

Las uniones a tope de elementos prefabricados se caracterizan por no transmitir esfuerzos estructurales entre ellos. En general, los elementos unidos a tope son de diseños estándar y no necesariamente se diseñan para un proyecto, además, como su unión no requiere ningún producto adherente es posible su desmontaje para que los elementos prefabricados puedan ser utilizados nuevamente. Un ejemplo común de uniones a tope son las losas industriales mostradas en la Figura 4.

Uniones machihembrado

Las uniones machihembrado corresponden a un tipo de unión seca que se basa en la unión por encajes geométricos, donde una parte del prefabricado posee una hendidura donde el otro elemento prefabricado se conecta. Esta unión podría entenderse como una mejora de las uniones a topes pues la unión machihembrada permite alinear los elementos al montarlos, generar soporte entre estos y también ayudar al control de permeabilidades. Es común ver este tipo de uniones en obras hidráulicas como tuberías y canaletas, y también en ductos, muros de contención, etc.

Uniones con pernos

En este tipo de uniones se logra la transmisión de esfuerzos mediante la utilización de pernos y placas de acero embebidas en el hormigón. Este tipo de uniones entrega multitud de soluciones para el análisis y transmisión de esfuerzos en estructuras de hormigón prefabricadas. Un ejemplo de unión con pernos es la conexión entre una zapata prefabricada y su respectivo pilar de hormigón prefabricado.

Uniones con postensados

Los elementos prefabricados de hormigón que se unen con cables postensados son fabricados con vainas (tubos de acero) que permiten el paso de cables que son tensados en obra para lograr que la estructura tenga la resistencia requerida. Este tipo de uniones tiene múltiples beneficios, entre ellos se tiene que no generan pérdida de energía por acortamiento del hormigón, se puede lograr una estructura monolítica con el postensado y se puede tener una estructura con estándares iguales o superiores a los de una estructura hormigonada in situ. Este tipo de uniones se puede observar en fundaciones, muros y estanques.

2.1.3. Secuencia en proyectos con prefabricados de hormigón.

Para la utilización de elementos prefabricados pesados de hormigón en faenas mineras es necesario llevar un proyecto coordinado entre toda la cadena de valor desde sus etapas más tempranas, previas a la inversión, como puede ser la ingeniería conceptual o básica.

Para lograr un desarrollo exitoso del proyecto es necesario contar con la participación de todos los involucrados. Esto sería, por ejemplo, considerar la experiencia de los proveedores de montaje y transporte para definir las plantas de posicionamiento de grúas y para definir el dimensionamiento de los elementos prefabricados, respectivamente. Todo lo anterior siendo considerado ya desde la etapa de factibilidad o ingeniería básica.

Para comprender de forma completa la secuencia de actividades que requiere el desarrollo de un proyecto con elementos prefabricados de hormigón, se presenta a continuación un listado con las etapas a considerar, las actividades realizadas y los responsables o involucrados en cada una de las etapas.

Tabla 1: Secuencias de actividades para el desarrollo de un proyecto con elementos prefabricados de hormigón.

Nº	Etapa	Actividades	Responsables e involucrados.
1	Preparación de bases técnicas.	Preparar bases técnicas para etapas de ingeniería (conceptual, básica y de detalles), diseños modulares y para fabricación, transporte y montaje de prefabricados.	Mandante
2	Licitación de ingenierías.	Se adjudican licitaciones de ingeniería con criterios de uso de prefabricados de hormigón.	Mandante
3	Ingeniería	Etapa de prefactibilidad (Ing. Conceptual). Se genera y seleccionan las opciones para el desarrollo del proyecto.	Mandante Empresa de ingeniería.
4	Ingeniería	Etapa de factibilidad (Ing. Básica). A partir de la opción tomada en la etapa anterior, se definen las dimensiones máximas de los elementos y los layout de las instalaciones para el posicionamiento de grúas.	Mandante Empresa de ingeniería Proveedores de: Fabricación, transporte y montaje de prefabricados.
5	Ingeniería	Definir Work Package's en BIM. Generar layout en planta de los espacios disponibles para grúas de montaje y lugares de acopio para prefabricados de hormigón.	Mandante Empresa de ingeniería Proveedores de: Fabricación, transporte y montaje de prefabricados.
6	Ingeniería	Ingeniería de detalles. Se calcula la resistencia de los elementos de hormigón, sus uniones, sus puntos de izaje, constructibilidad e insertos.	Mandante Empresa de ingeniería
6	Licitación de fabricación	Con la ingeniería de detalles definida se licita la fabricación de los elementos prefabricados de hormigón.	Mandante Empresa de ingeniería
7	Adjudicación y comienzo de producción.	Se adjudica la licitación para fabricación y luego comienza la producción de los moldajes y de los elementos prefabricados.	Mandante Empresa prefabricadora
8	Pruebas de armado	A medida que avanza la fabricación se debe realizar un pre-montaje de los elementos en la planta de fabricación para asegurar que las dimensiones permitan la unión según el diseño.	Mandante Empresa prefabricadora

9	Licitación y contratación de logística.	Se licita y contrata transportista (con sus respectivos seguros de traslado). De ser necesario se debe licitar y contratar áreas para acopio.	Mandante Empresa de ingeniería Proveedor de transporte
10	Licitación y contratación de construcción.	Se licita y contrata contratista para construcción, considerando experiencia previa en montaje de elementos prefabricados.	Mandante Empresa de ingeniería Contratista de construcción.
11	Movilización de personal y equipos	Movilización de personal y equipos especializados del contratista de construcción.	Contratista de construcción.
12	Preparación áreas de trabajo.	Preparación de caminos, niveles, trazados, excavación, áreas de acopio.	Contratista de construcción.
13	Transporte	Transporte de elementos prefabricados a la faena, según capacidad de acopio en obra y previo a su montaje.	Proveedor de transporte. Contratista de construcción.
14	Previo a montaje	Compactación de subsuelo, emplantillado, instalación de placas de nivelación (de ser necesario).	Contratista de construcción.
15	Montaje	Montaje de los elementos prefabricados.	Contratista de construcción.
16	Entrega	Relleno, compactado y terminaciones según sea requerido.	Contratista de construcción.

Es necesario destacar, que los elementos de tipo 1 (presentados en la sección 2.1.1.1) no son considerados en el listado de actividades, pues debido a sus características genéricas y que es posible encontrarlo en grandes volúmenes en el mercado de la construcción no requieren el desarrollo de un proyecto para su utilización.

3. Desarrollo

3.1. Fabricación de elementos prefabricados pesados

En este capítulo se busca analizar las áreas claves para la planificación y coordinación en la fabricación de elementos prefabricados de hormigón, y de esta forma proponer un proceso eficiente asegurando la calidad e integridad de las piezas fabricadas. Un proceso de fabricación desarrollado correctamente permitirá, entre otras cosas, reducir los desechos in situ y permitirá optimizar los tiempos de construcción.

Para analizar la etapa de fabricación de elementos prefabricados pesados de hormigón se comenzará revisando los distintos moldajes utilizados y la preparación necesaria para utilizarlos. Posteriormente se revisará las etapas pertinentes a la fabricación como tal, revisando la instalación de armaduras e insertos, preparación y traslado del hormigón, vaciado y traslado del hormigón, terminación del hormigón, y finalmente desmolde y traslado a patio de acopio.

El enfoque principal de este capítulo es hacia los elementos prefabricados de tipo 3 y 4, pues debido a sus características los elementos de tipo 1 y 2 son de uso genérico, de menores dimensiones y peso, por lo que no requiere mayor análisis.

3.1.1. Moldajes.

Los moldajes son los elementos que permiten dar forma a la pieza y contener el hormigón fresco. Su participación en el proceso es tan importante que debe ser considerada en las etapas de diseño e ingeniería identificando su materialidad y características, aun mas se está trabajando con piezas especiales y de grandes dimensiones.

Dentro de la industria nacional es posible encontrar diversas materialidades para los moldajes, como por ejemplo, acero, madera, plástico, etc. A continuación se presenta una breve descripción según el material del moldaje.

- **Metal:** Es el material más usado en la industria de los moldajes debido a su precisión geométrica, rigidez, durabilidad y la posibilidad de generar mecanismos automáticos e hidráulicos.
- **Madera:** La madera ha sido utilizada durante la mayor parte de la historia del hormigón armado. Comúnmente se utiliza en piezas o proyectos de menor tamaño, pues, es necesario revisar su controlar que no pierda sus características y forma para no generar perdidas de hormigón o fallas en la forma del elemento hormigonado.
- **Plástico:** Hoy en día es posible encontrar moldajes de plástico reciclado y su utilización se encuentra en constante desarrollo para ampliar los productos y

soluciones. Es posible encontrar moldajes de poliamida, polipropileno, entre otros.

Para la fabricación de elementos prefabricados pesados el material más utilizado, prácticamente exclusivamente utilizado, es el metal debido a sus características.

Madera



Metal



Plástico



Figura 8: Moldajes según distintas materialidades.

3.1.1.1. Consideraciones para el uso de moldajes

Como se mencionó anteriormente, para proyectos importantes y piezas de grandes dimensiones, los diseños e ingeniería deben incluir las características y materiales de los moldajes a utilizar en las plantas de prefabricación, pues esto influirá directamente en: la

productividad, nivel de precisión, terminaciones y la posibilidad de incluir insertos en cada cara del elemento.

Para la producción de moldajes se debe privilegiar un proceso robotizado y automatizado, además de la estandarización en las dimensiones, y así, lograr series en la producción de los moldajes, utilizando, por ejemplo, robots para soldar las piezas.



Figura 9: Sistema automatizado en la soldadura de moldajes.

Una solución frecuentemente utilizada para lograr una altura de trabajo ergonómica y con estrictas tolerancias que permitan una producción milimétrica de moldajes, es una mesa de perfiles y planchas de acero. Para asegurar que los elementos puedan ser desmoldados de canto se pueden incorporar a las plantas de producción sistemas de mesas hidráulicas basculantes.



Figura 10: Mesa hidráulica basculante.



Figura 11: Sistema de mesas moldaje.

Los moldajes siempre deben considerar puntos de izaje centrados para ser levantados en las etapas de preparación y desmoldaje de la pieza. Además, se debe considerar la posición de los insertos, la cual debe ser milimétrica, al igual que los moldajes y armaduras. Para lograr esto, se utilizan accesorios (ver Figura 13) que se anexan al moldeaje y permiten mantener la posición de los insertos durante el vaciado del hormigón.



Figura 12: Moldajes con puntos de izaje.



Figura 13: Elementos guía para insertos.

3.1.2. Producción de prefabricados.

Cuando se habla de prefabricados pesados de hormigón se hace referencia a elementos de tipo 3 y 4, los que comúnmente son elementos hechos a la medida, según el tipo de proyecto en el que se utilizarán, por lo que, la utilización de líneas automatizadas o robotizadas, como las presentas en la sección de moldajes, se hace más difícil.

Es posible encontrar una gran variedad de sistemas de fabricación para la misma pieza de hormigón e incluso estos métodos pueden cambiar de fabrica a fabrica, es por este que en el presente capitulo se hablará de etapas principales que se encuentran en la prefabricación de elementos pesados de hormigón.

La prefabricación de hormigón puede considerar 4 elementos principales:

- **Envolvente:** es el conjunto de paneles que forman el moldaje exterior de la pieza y le dan la forma.
- **Núcleo principal:** es el manto que permite generar un receso geométrico en el interior de la pieza.
- **Vibradores:** generalmente constituidos por sistemas de alta frecuencia manuales o adosados a los paneles utilizados en la envolvente.
- **Sistemas de izaje/carguío:** Sistemas de grúas, carros, pórticos o puentes grúa utilizados para mover las piezas prefabricadas o los moldajes utilizados a sus respectivas zonas de acopio y/o almacenaje.

3.1.2.1. Secuencia de fabricación a considerar.

A continuación se presenta la secuencia principal que puede ser considerada en la fabricación de elementos pesados de hormigón. Esta secuencia resulta útil pues permite revisar de forma general como se entrelazan los distintos actores y etapas del proceso de fabricación y así lograr un mejor entendimiento.

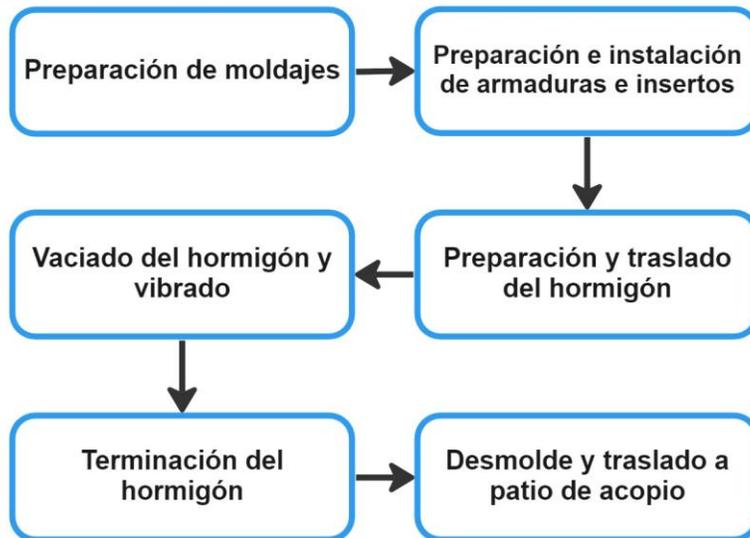


Figura 14: Secuencia de actividades generales a considerar en fabricación de elementos prefabricados pesados de hormigón.

Las etapas mencionadas en la Figura 14 serán descritas a continuación, de esta forma se podrá profundizar en las consideraciones y principales características de estas.

3.1.2.2. Preparación de moldajes.

Debido que el material más utilizado en los moldajes es el acero es común que estos se utilicen en reiteradas ocasiones, es por ello que después de cada uso se deben retirar los remanentes de hormigón y la lechada que quedo en los moldajes. No se deben golpear los moldajes para limpiarlos, pues esto puede generar deformaciones o dañar las sus superficies. Se recomienda el uso de sistemas de lavado a presión para limpiar los moldajes.



Figura 15: Limpieza de moldajes.

En la preparación de los moldajes para el hormigonado es posible utilizar una delgada capa de desmoldante que facilite el posterior retiro del moldaje de la pieza, esto permitirá retirar el moldaje sin mayores riesgos de dañar la superficie de la pieza y además hace más rápido el proceso de retiro del moldaje.



Figura 16: Aplicación de desmoldante en superficie interior de moldajes.

3.1.2.3. Preparación e instalación de armaduras e insertos.

Preparación

En las plantas de fabricación se tienen zonas de elaboración de las armaduras que se utilizarán en las piezas prefabricadas, la materia prima (acero) se almacena en bodegas acondicionadas para esto y ubicadas en la misma planta. El acero se almacena en rollos o en paquetes de barras.

Cuando los diámetros de las armaduras se encuentran en el rango de 5 a 10 milímetros se suelen encontrar en rollos de acero, los cuales se encuentran en formatos de 1.5 toneladas. Por otra parte, los paquetes de barras (diámetros sobre 10 milímetros) se encuentran en formatos de 6 o 12 metros de largo, con pesos que varían entre 1 a 2 toneladas por paquete.

Cuando se utilizan hormigones in situ se tiene una merma de acero por el dimensionado que puede superar el 5% (siendo este valor el comúnmente adoptado). Al utilizar elementos prefabricados este porcentaje es menor pues se puede trabajar con material elaborado a medida por los proveedores de acero o se pueden utilizar máquinas de enderezamiento de rollos de acero, las que no generan acero de despunte.



Figura 17: Paquetes de barras y rollos de acero.

Una vez que se tiene el material disponible en la zona de elaboración, se corta y dobla según las especificaciones de la pieza a hormigonar. La confección de la armadura puede ser realizada con alambre amarrado o con soldadura, siendo la primera opción la que más se utiliza en los proyectos.

El armado de enfierradura requiere un trabajo de precisión pues en ocasiones se debe incorporar recesos en la enfierradura y por ende el doblado debe ser el adecuado para cumplir con las dimensiones y recubrimientos de la pieza. Es en este contexto que la utilización de modelos 3D o BIM juegan un papel fundamental, pues permiten revisar los aspectos técnicos previos a proceder a la fabricación.

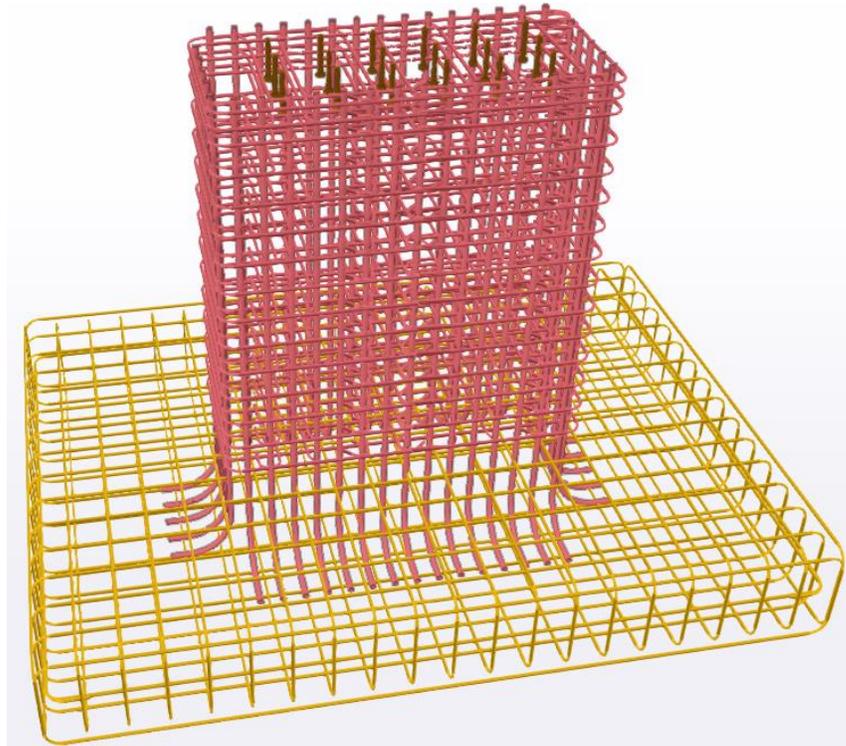


Figura 18: Modelo 3D de enfierradura para fundación prefabricada.

En la Figura 18 es posible observar un modelo 3D de una fundación prefabricada utilizada en el proyecto en el cual el alumno participó, pudiendo apreciarse los insertos y pernos que esta considera.

La confección y preparación de las armaduras es un proceso que puede ser realizado de forma simultánea a la preparación de moldajes y hormigón, lo que representa una clara ventaja respecto al hormigonado in situ, pues en ese caso no es posible realizar esas actividades a la vez.

Instalación

Una vez que la armadura ha sido preparada y cortada se debe instalar dentro de los moldajes para su posterior hormigonado. Para asegurar que pieza tenga el recubrimiento establecido por ingeniería se utilizan espaciadores entre la enfierradura y el moldaje, y se debe procurar que la enfierradura se encuentre estable y firme en su posición, esto con el fin de evitar movimientos inesperados cuando el vaciado del hormigón sea llevado a cabo.



Figura 19: Distintos tipos de separadores para hormigón armado.

Además de la enfierradura, previo al hormigonado, se deben instalar los insertos (si es que la pieza los considera). Los insertos corresponden a elementos adicionales inmersos en el hormigón con diversos propósitos como: sistemas de izaje, unión con otras estructuras (metálicas por ejemplo), entre otros. Los insertos más comunes son sistemas en base a pernos, placas y barras.



Figura 20: Fundación prefabricada con sistema de insertos con pernos (tomada por alumno).

Dentro de los insertos que pueden incluir las fundaciones prefabricadas se tienen los sistemas de izaje, estos pueden ser diferenciados entre temporales y permanentes. Los sistemas temporales son considerados para usos limitados, ya sea, dentro la planta de fabricación, traslado y/o montaje de un proyecto único. Los sistemas temporales consideran el uso de acero liso dulce, tipo A36 o SAE1020, con sistemas de cables o torones, según sea el caso.



Figura 21: Sistema de izaje temporal con torones en prefabricados pesados de hormigón (tomada por alumno)

Por su parte, los sistemas de izaje permanente son diseñados para poder ser utilizados de forma indefinida dentro de un plazo de tiempo definido, esto se da cuando el elemento se diseña para ser utilizado en más de un proyecto. Los sistemas de izaje permanente deben considerar la suficiente protección que permita su utilización en múltiples ocasiones a lo largo de la vida útil del elemento prefabricado.

Para proteger los puntos de izaje permanentes se pueden utilizar sistemas en que se rellenan las reservaciones con grasa, colocar un sello en el contorno de la tapa giratoria de cierre en acero y luego fijar la tapa al hormigón, de esta forma se protegen los puntos de izaje.

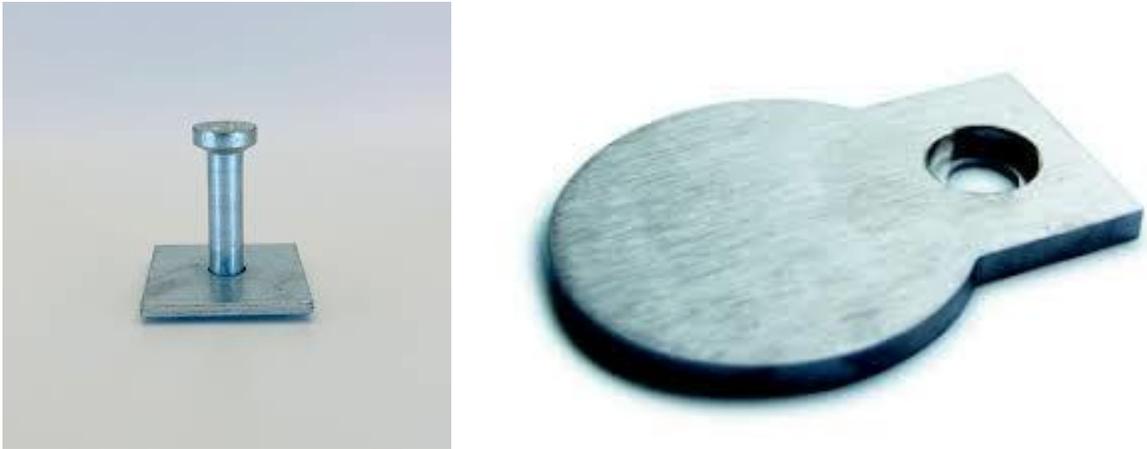


Figura 22: Perno de izaje galvanizado y tapa de reservaciones para izaje.

El trabajo realizado en las plantas de prefabricación permite realizar un control milimétrico de la posición de la enfierradura y de los insertos, aumentando los estándares de calidad y reduciendo las posibilidades de tener problemas con la instalación de equipos o estructuras metálicas en los insertos.

3.1.2.4. Preparación y traslado del hormigón.

La preparación del hormigón para elementos prefabricados pesados es similar a la que se realiza para los hormigones realizados in situ. La mixtura de los componentes del hormigón, previamente dosificados, se realiza en plantas de hormigón que cuentan con los siguientes componentes:

- Acopio de áridos
- Silos de cemento
- Estanques de agua
- Estanques de aditivos
- Betoneras de mezclado

Al igual que para el hormigonado in situ, los materiales deben ser almacenados en condiciones óptimas y se debe buscar controlar la humedad por la influencia que esta

tiene en la resistencia del hormigón (relación agua-cemento). El transporte de los materiales a la betonera de mezclado se suele realizar mediante los siguientes métodos:

- Sistemas helicoidales sin fin para el cemento
- Capachos de transporte para los áridos de los acopios.
- Vertido por inyección de agua
- Vertido por inyección de aditivos

Una vez que la mezcla ha sido realizada, se traslada el hormigón al sitio de vertido mediante el uso de cintas transportadoras, volquetes o camiones mixer.

3.1.2.5. Hormigonado y vibrado.

Al igual que para cualquier proyecto, el hormigón utilizado en elementos prefabricados pesados debe cumplir con todos los requerimientos de resistencia, calidad y trabajabilidad establecidos por el diseño de ingeniería. De igual forma se necesita que el hormigón alcance una resistencia temprana que permita su rápido desmolde y trabajabilidad.

Para controlar la trabajabilidad del hormigón se utiliza el “Cono de Abrams”, el que considera el uso de una herramienta cónica, de metal y que busca medir el asentamiento que tiene el hormigón. Por otro parte, cuando se trabaja con hormigones fluidos y auto-compactantes se mide el diámetro del fluido remanente.

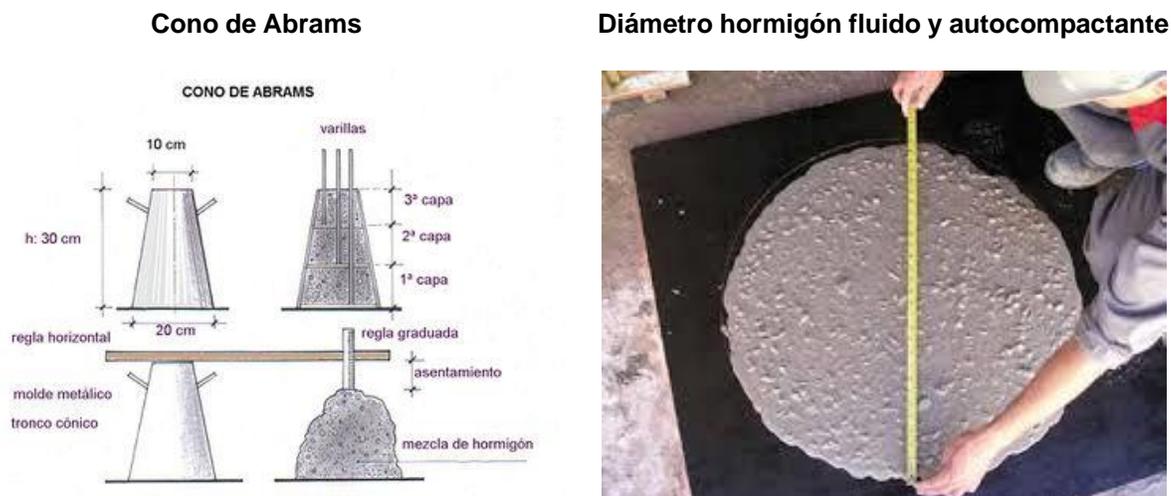


Figura 23: Medición de trabajabilidad del hormigón.

Previo al vaciado del hormigón se debe asegurar la estanqueidad de los moldajes, su correcto aplome y que cada elemento (enfierradura, insertos, gatas etc) se encuentre correctamente afianzado de manera que no ocurran aperturas de moldaje o que los elementos pierdan su posición de diseño.

Para el vaciado del hormigón se debe tener un acceso seguro y estable para el personal encargado de esta labor, así por ejemplo, si se está hormigonando un elemento

en altura, se debe contar con andamios estables y seguros que permitan el acceso a la zona de hormigonado.

El vaciado del hormigón puede ser realizado por distintos métodos. Este puede ser a partir de cintas transportadoras, sistemas mixer, sistemas de volteo (capachos) o directamente desde la planta de mezclado. Independiente de cuál sea el método utilizado para el vaciado del hormigón se debe evitar la segregación de la mezcla y mantener una altura de caída baja.



Figura 24: Ejemplo de hormigonado directo en planta prefabricadora.

Una vez que la mezcla ha sido vertida es necesario compactarla dentro del moldaje, para esto se utilizan vibradores inmersos en la mezcla o se hace vibrar el conjunto entero.

Es posible compactar el hormigón mediante equipos de vibración de mesas conectados a los moldajes, con regla en superficie, con sondas de inmersión en la mezcla, entre otros. Es importante que sea cual sea el equipo utilizado para vibrar la mezcla se controlen los tiempos de vibración, pues excederse puede resultar, por ejemplo, en la formación de nidos.

Cuando se trabaja con vibradores adheridos a los moldajes se debe garantizar que estos tengan la energía suficiente para vibrar toda la mezcla, por lo que es probable que se utilice más de un vibrador adosado a las paredes de los moldajes.

Finalmente, si se trabaja con hormigones fluidos y autocompactantes no se tiene la necesidad de vibrar la mezcla, lo que resulta en un proceso más eficiente, pues no se debe dedicar tiempo a la vibración de este, además de disminuir el daño en los moldajes por la vibración.

3.1.2.6. Terminación de hormigón.

Cuando el hormigón prefabricado es terminado de forma manual se debe procurar sellar bien las superficies del hormigón fresco, esto con el objetivo de obtener superficies lo más plana y homogéneas posibles.

Es claro que las caras del elemento prefabricado que son terminadas de forma manual serán distintas a las caras que estaban en contacto directo con el moldaje. Este punto debe ser considerado en el diseño para mantener aspectos de estética y durabilidad.

Sellar las superficies, ya sea la que está en contacto con el moldaje o la que se realiza de forma manual, es muy importante, pues como es sabido, mientras más lento se elimina el agua del hormigón, mayor es su calidad, por ende, un correcto sellado de las superficies favorece atrapar el agua libre en el hormigón recién vaciado.



Figura 25: Terminación manual de superficie de hormigón.

Una vez que se ha realizado la terminación del hormigón se deben humedecer las superficies para lograr un correcto proceso de curado de la pieza prefabricada. Esto puede ser realizado por sistemas de roció constante de agua, vapor o uso de membranas de curado. Es imprescindible proteger la pieza prefabricada de cambios bruscos de temperatura y exposiciones directas al viento, esto con el fin de evitar pérdidas excesivas de agua.

Finalmente, para controlar la resistencia del hormigón previo al retiro del moldaje, existen diversos métodos, siendo los más comunes los siguientes:

- Métodos estadísticos
- Por maduración
- Por ensayo de testigos
- Martillo de Schmidt (sistema de rebote)

3.1.2.7. Desmolde y traslado a patio de acopio.

Una vez que se ha verificado que la resistencia del hormigón sea la suficiente para su desmolde, se procede a la apertura de este y posterior retiro de la pieza endurecida. Es importante que esta maniobra haya sido considerada en el diseño estructural del elemento, ya que estamos hablando de elementos de gran peso (y tamaño) que aún no han alcanzado su resistencia final y será sometido a tensiones puntuales.

Se debe tomar en cuenta que los insertos para izaje utilizados para el retiro de los moldajes en la planta de prefabricación son, en la mayoría de los casos, distintos a los utilizados para su traslado y montaje en faena, es por ello que estos deben ser bien rotulados y especificados en su diseño.

En general, luego de permanecer 7 días en zonas protegidas, con curado constante se procede al traslado de los elementos a las zonas de acopio con equipos de izaje previamente definidos. Como se verá más adelante, existen diversos equipos para llevar a cabo el izaje de las piezas, lo importante es que estos deben ser definidos previamente según la forma del elemento, al igual que los componentes que se requieran para el izaje (yugos, aparejos, cadenas, ganchos, etc.)

Cuando los elementos prefabricados han sido trasladados a las zonas de acopio se debe procurar que:

- Los suelos sean resistentes, nivelados y horizontales.
- La pieza se encuentre correctamente rotulada y a la vista.
- Accesos vehiculares y peatonales claramente delimitados.
- Iluminación, si se requiere trabajo nocturno.



Figura 26: Acopio de dovelas prefabricadas.

3.2. Transporte de elementos prefabricados pesados.

En este capítulo se busca analizar las áreas claves para la planificación y coordinación del transporte de elementos prefabricados pesados de hormigón que permitan proponer prácticas seguras y eficientes que entreguen beneficios económicos y de tiempo en cada faena minera donde se empleen estos elementos.

Además, se busca proponer prácticas que permitan obtener un transporte seguro por las vías públicas, conocer el marco legal que regula el transporte de elementos pesados y/o sobredimensionados y conocer los equipos de transporte que permiten mover estos elementos prefabricados.

Siendo necesario aclarar que para esto solo se consideran los elementos prefabricados de tipo 3 y 4, pues debido a sus características los elementos de tipo 1 y 2 son de uso genérico, de menores dimensiones y peso, por lo que no requiere mayor análisis.

3.2.1. Logística eficiente.

Para lograr un transporte exitoso de elementos prefabricados pesados de hormigón es necesario considerar la logística como una actividad que debe estar protocolizada en el proyecto o incluida como procedimiento de trabajo, de esta forma se pueden obtener beneficios como:

- La consolidación de la cadena de abastecimiento para los prefabricados pesados de hormigón.
- La optimización de espacios en faena, en los centros de acopio y en la fábrica.
- La mantención del programa y el control de los proyectos.

Mantener una logística eficiente permite, entre otras cosas, mejorar las estrategias de descarga en faena, pues por ejemplo, con una logística bien coordinada se puede utilizar una estrategia donde el elemento prefabricado sea descargado en el momento preciso previo a su montaje, evitando la necesidad de generar acopios en faena para estos elementos (recordando que son elementos pesados), evitando la necesidad de tener equipos de izaje en los patios de acopio (que debido al peso de los elementos deberán ser equipos de alta capacidad) y también disminuyendo la cantidad de veces que será necesario izar el prefabricado, pues en lugar de pasar del camión al acopio y luego del acopio al lugar donde será el montaje, se puede pasar directamente del camión al montaje de la pieza.

A continuación se presenta una secuencia general de actividades logísticas que resulta útil considerar en la utilización de prefabricados pesados de hormigón, relacionando a los distintos actores de la cadena de abastecimiento de estos elementos.

3.2.1.1. Secuencia de actividades a considerar.

La secuencia presentada a continuación resulta útil pues permite observar de forma global como se entrelazan los distintos actores en la cadena de los elementos prefabricados. Esta secuencia es continuación de la etapa de fabricación revisada en el capítulo anterior.

Las fases de transporte a revisar deben estar descritas en los procedimientos de logística y trabajo del proyecto, dejando en claro las responsabilidades de los participantes en cada ocasión. A continuación, en la Figura 27, se presenta la secuencia de actividades generales a considerar en la etapa de transporte en un proyecto con prefabricados pesados de hormigón:

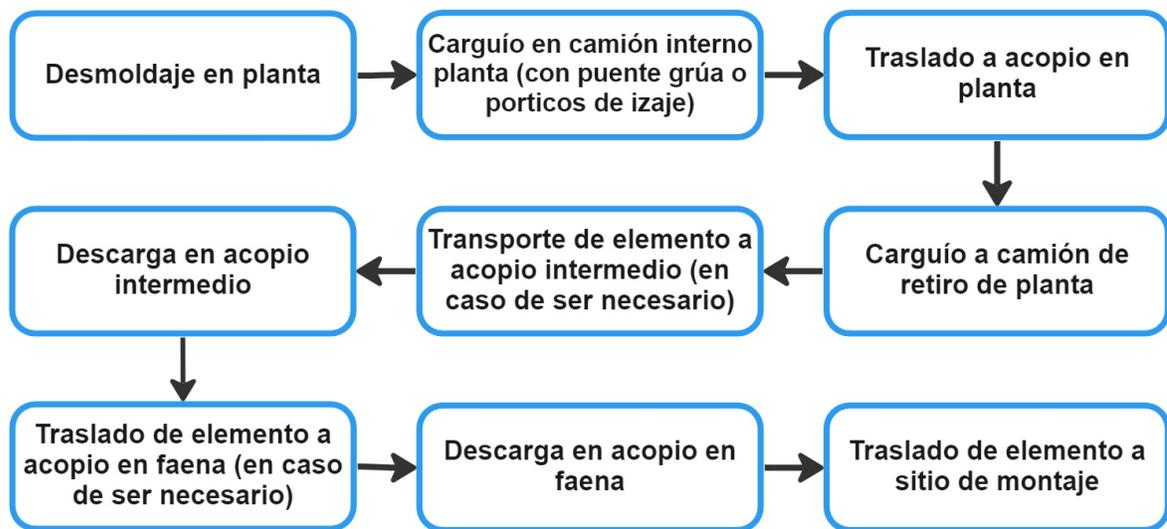


Figura 27: Secuencia de actividades generales a considerar en el transporte de prefabricados pesados de hormigón.

Debido a que entre las diferentes etapas del transporte de los elementos prefabricados pesados de hormigón se llevarán a cabo maniobras de izaje, giro y volteo de las piezas resulta útil definir, previo a la carga en el transporte, la orientación de las piezas, esto con el objetivo de llevar a cabo una descarga lo más eficiente y segura posible en la faena. En la Figura 28, se puede observar que en ocasiones los espacios en faena son reducidos, pudiendo ser aun menores cuando se trabaja en áreas brownfield, es por ello que planificar la orientación de la pieza en el transporte puede resultar tremendamente beneficioso para la descarga de los elementos a pie de faena.



Figura 28: Descarga de elemento prefabricado pesado de hormigón en faena minera con espacio reducido (tomada por alumno).

3.2.2. Transporte

Una vez que se conocen las actividades o etapas a realizar en el transporte de los elementos prefabricados pesados es posible analizar y revisar las consideraciones que se deben tener para llevar a cabo el traslado y además los equipos e implementos que se utilizan para ello.

En primera instancia, es necesario considerar todas los factores del proyecto al momento de planificar el transporte de los elementos prefabricados pesados, esto para las distintas etapas presentadas en la Figura 27. Es por esto, que a continuación se presenta un listado de características del proyecto que como base deben ser consideradas en la planificación del transporte.

→ Dimensiones de los elementos prefabricados, tamaño y peso.

- Características de los equipos de transporte a utilizar, peso, tamaños, tipo de equipo y consumo de combustible.
- Características técnicas de los elementos a transportar, puntos de anclaje e izaje.
- Plazos de tiempo disponible para llevar a cabo cada actividad.
- Requerimientos y condiciones de seguridad en las actividades.
- Espacios disponibles en faena y/o acopios para maniobras y descarga de los elementos prefabricados.
- Estado de las rutas y terrenos para el tránsito de los equipos.
- Condiciones climáticas.
- Revisión de certificaciones y licencias para operadores de los equipos de transporte.
- Sistema documental que será utilizado para realizar el control y gestión del transporte.

Con el listado entregado es incluso posible realizar los procedimientos de trabajo exigidos por las empresas mineras a los contratistas para las actividades importantes o críticas a realizar, en este caso el transporte de los elementos prefabricados pesados de hormigón.

Para esto, los procedimientos deben incluir una descripción de las actividades a realizar, el responsable de cada actividad, establecer de forma escrita como se llevará a cabo cada actividad, las herramientas y equipos que serán utilizados para llevar a cabo la actividad y finalmente establecer en que etapa del proyecto se llevará a cabo dicha actividad.

3.2.3. Tipos de transporte

En la presente sección se analizan y presentan los distintos equipos utilizados para el transporte de prefabricados pesados de hormigón, que como se ha comentado previamente corresponde a los elementos de tipo 3 y 4.

3.2.3.1. Camiones con rampla plana

Los camiones con rampla plana son los camiones más comunes en el transporte de cargas, poseen dimensiones útiles de carga desde los 12 a los 14,5 metros de largo con un ancho exterior de 2,6 metros.

Es posible encontrar las rampas planas desde 1 a 3 ejes y se recomienda una carga máxima de 28 toneladas, siempre y cuando no se sobrepasen los pesos máximos que la

ley establece por eje, en la sección 3.2.5 se revisa la normativa y las combinaciones de peso que establece la ley según el equipo de transporte.

A continuación, en la Figura 29, es posible observar la llega a faena de elementos prefabricados pesados transportados por camiones con rampla plana de 3 ejes.



Figura 29: Camiones rampla plana cargados con elemento prefabricado (tomadas por alumno).

3.2.3.2. Camiones con cama baja.

Corresponden a camiones con acoplado (semirremolque) de chasis bajo, lo que permite transportar y maniobrar cargas de mayores dimensiones que las que es posible transportar con rampas planas. Este tipo de acople es el más utilizado para transporte de equipos y elementos prefabricados pesados y de grandes dimensiones, como vigas, dovelas, fundaciones y muros.

Algunas camas bajas tienen la ventaja de desmontar parte del acoplado (conocido como cuello desmontable) lo que permite dejar parte del remolque apoyado en el suelo y con un extremo “abierto”, es común que esto se utilice para transporte de equipos como excavadoras, grúas horquilla, etc. En la Figura 30 es posible ver el funcionamiento del cuello desmontable de la cama baja.





Figura 30: Funcionamiento de cuello desmontable en cama baja.

En el mercado nacional es posible encontrar camas bajas con las siguientes características:

- Entre 2 a 4 ejes.
- Largos entre 15-20 metros.
- Anchos entre 2,6 y 3,2 metros.
- Capacidades de 35, 50, 60, 70, 80, 100 y hasta 120 toneladas, siendo esta última pensada para el transporte de elementos de la industria minera.

A continuación, en la Figura 31, se presenta la descarga de un elemento prefabricado de 32 toneladas de un camión cama baja, con 3 ejes y posibilidad de agregar un 4 eje.



Figura 31: Cama baja cargada con elemento prefabricado (tomada por alumno).

3.2.3.3. Camiones con rampla especiales para elementos prefabricados.

En el mundo de transportes es posible encontrar ramblas especialmente diseñadas para facilitar el transporte de elementos prefabricados, por ejemplo, en la *Figura 32* se puede observar un camión con rampla que posee un espacio en el centro, lo que permite transportar elementos prefabricados de forma vertical y así evitar sobrepasar el ancho máximo para cargas, teniendo también soportes de carga que permiten transportar los elementos de forma segura. Además, este tipo de ramblas posee un sistema hidráulico que permite cargar y descargar los elementos prefabricados sin necesidad de grúas, siempre y cuando el terreno lo permita ([video de referencia](#)).

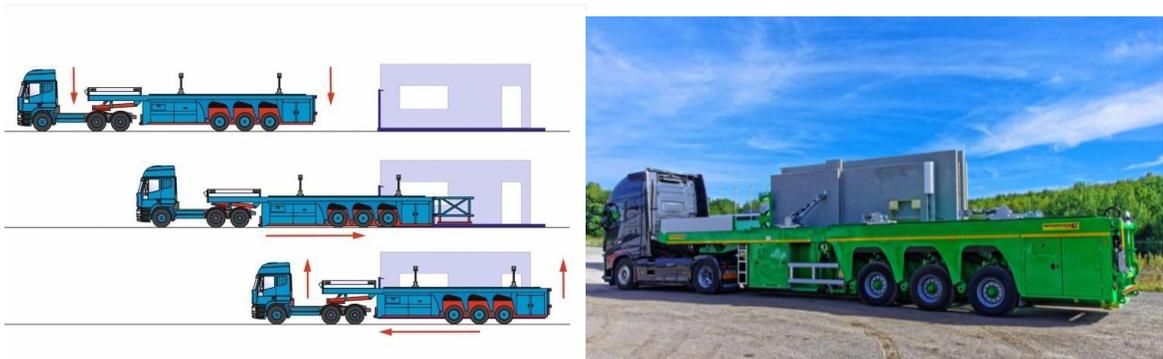


Figura 32: Transporte especial de prefabricados pesados de hormigón.

De igual forma se pueden encontrar ramblas con el chasis modificado, con el objetivo de transportar cargas inclinadas o de reforzar este para prefabricados pesados de hormigón. En la Figura 33 se puede ver la fabricación de un chasis reforzado para transportar elementos prefabricados de forma inclinada, esto permite transportar elementos de mayores dimensiones sin necesidad de sobrepasar el ancho estipulado por la ley.

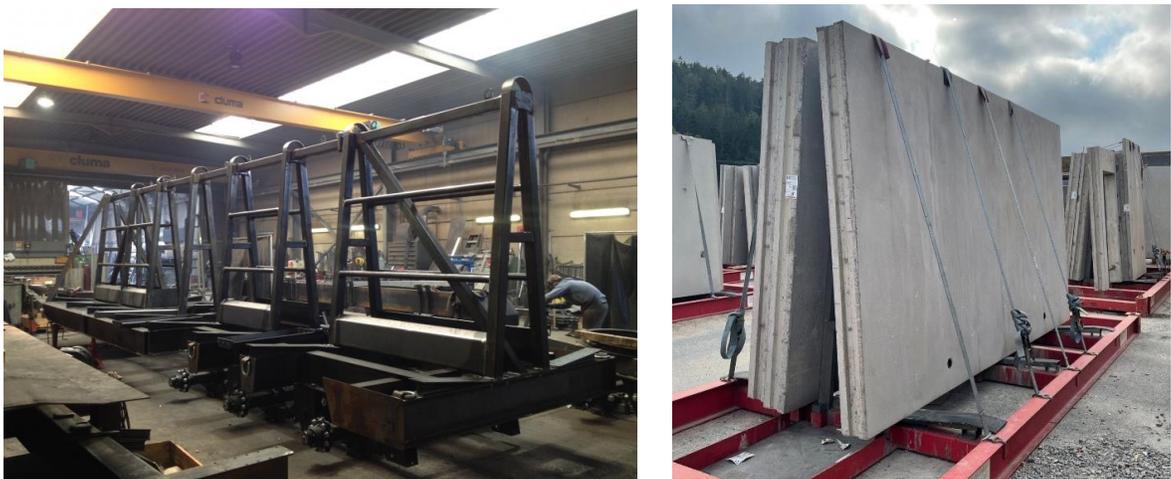


Figura 33: Ramblas especiales para el transporte de elementos prefabricados pesados.

Si bien es cierto este tipo de chasis no son utilizados de forma habitual en la construcción en faenas mineras, entre otras cosas, por las complicaciones que imponen los terrenos y caminos donde se desarrollan estos proyectos, es importante tener noción de su existencia.

3.2.3.4. Camiones con prefabricados sobre dimensionados.

El Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones establece a través de la Resolución N°1 de 1995 que el largo máximo permitido para el conjunto camión y semirremolque es de 18,60 [m] y 22,40[m] cuando se transportan exclusivamente vehículos.

De esta forma, cuando en el proceso de dimensionamiento de las piezas de hormigón prefabricado no fue posible obtener elementos que se encuentren dentro del rango que establece la ley para el transporte de cargas es necesaria la utilización de sistemas especiales de rampas y acoplados diseñados para las piezas que serán transportadas.

Además el transporte de estas cargas requiere ser acompañado por camionetas escolta y cuando se transita por áreas urbanas se requiere que Carabineros acompañe la caravana. Lo anterior ocurre pues las cargas pueden alcanzar longitudes mayores a 40 metros y/o anchos que utilicen más de una calzada.

Es por lo anterior que surge la necesidad de utilizar camiones con remolques especiales que permitan el transporte de estos elementos, en la Figura 34 es posible observar el transporte de una viga prefabricada de hormigón en un remolque especial para cargas sobredimensionadas, en este caso en el largo.



Figura 34: Transporte de viga prefabricada sobredimensionada.

En la sección 3.2.4 se revisará la normativa legal para los pesos y dimensiones que regula el transporte de cargas en Chile, además de indicar los pasos a seguir para poder autorizar el transporte cargas especiales que exceden estos rangos.

3.2.4. Autorización para transporte de cargas pesadas y/o sobredimensionadas.

Debido a que el enfoque de este trabajo de título es a los prefabricados pesados de hormigón, es muy probable encontrarse con piezas prefabricadas que excedan los límites legales de tamaño y peso para su transporte, esto puede ocurrir pues en ocasiones los requerimientos de los proyectos son tales que las etapas de ingeniería no logran generar un dimensionamiento que permita que las piezas estén dentro del rango máximo de tamaño y peso que establece la ley para su transporte.

Como se mencionó previamente el largo máximo se encuentra regulado en la Resolución N°1 de 1995 del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones de Chile, sin embargo, esta resolución también establece los altos y anchos máximos permitidos, es por ello que a continuación se presentan las dimensiones máximas para alto, ancho y largo que establece la RES MTT N°1 de 1995 (pertinentes al transporte de elementos prefabricados de hormigón):

- | | |
|--|-----------|
| A) Ancho máximo exterior, con o sin carga: | 2,60 [m]. |
| B) Alto máximo, con o sin carga, medido desde el suelo: | 4,20 [m]. |
| C) Largo máximo, considerado entre los extremos anterior y posterior del vehículo: | |
| C.3) Camión: | 11,00[m] |
| C.4) Semirremolque (exceptuando transporte de vehículos): | 14,40[m] |
| C.5) Remolque: | 11,00[m] |
| C.6) Tractocamión con semirremolque: | 18,60[m] |
| C.7) Camión con remolque o cualquier otra combinación: | 20,50[m] |

Por su parte, el Decreto Supremo MOP N°158 de 1980 fija el peso máximo de los vehículos que pueden circular por caminos públicos. En la Figura 35, se presentan los pesos máximos por eje o conjunto de ejes que establece el D.S. MOP N°158 de 1980.

Tipo de Eje	Tipo de Rodado	Límite de Peso (Ton.)
Simple	Simple	7
Simple	Doble	11
Doble	Simple	14
Doble	Doble + Simple	16
Doble	Doble	18
Triple	Simple	19
Triple	2 Doble + 1 Simple	23
Triple	Doble	25
Cuádruple	Doble	29
Simple (compuesto por semiejes)	Múltiple (4 ruedas)	12
Simple (compuesto por semiejes)	Múltiple (8 ruedas)	14

Figura 35: Peso máximo por eje o conjunto de ejes. (DS MOP N°158 de 1980).

El eje cuádruple solo puede ser utilizado con autorización de vialidad para el transporte de cargas indivisibles. Luego, el decreto establece que las combinaciones entre camión y remolque o semirremolque no pueden exceder los siguientes límites de peso bruto total:

- Combinación de un camión con uno o varios remolques: 45 [ton].
- Combinación de camión con un semi-remolque, con eje posterior simple o doble:

Tabla 2: Límites de peso para camión con semirremolque con eje posterior simple o doble

Largo [m]	Peso total bruto [ton]
Menos de 13	39
Entre 13 y 15	42
Más de 15	45

- Combinación de un camión con un semirremolque con eje posterior triple: 45 [ton]

En vista de lo anterior, ¿Qué ocurre cuando la carga sobrepasa los límites de tamaño y/o peso? En estos casos se requiere la autorización de la Dirección de Vialidad para poder transportar los elementos, esta autorización solo puede ser solicitada cuando la carga es *indivisible*. Para obtener dicha autorización existe un procedimiento establecido en el “Manual de Autorizaciones para Transportes Especiales” (última versión 2018).

Este manual contiene toda la información legal, requisitos, condiciones y pasos necesarios para solicitar la autorización de cargas pesadas y/o sobredimensionadas *indivisibles*. A continuación se presenta un listado resumen con los puntos a considerar para solicitar el transporte de cargas pesadas y cargas sobredimensionadas.

1. Identificación de la empresa.
2. Información de la carga: Descripción de la carga, peso en toneladas (carga tara y peso bruto total).
3. Información del trayecto: Inicio y termino exacto, rutas a recorrer, total de Km.
4. Información de patentes y dimensiones totales: Tipo de patente, dimensiones totales de ancho, alto y largo.
5. Configuración de ejes: Distancia entre conjuntos, tipos de ejes, peso por eje, número de ruedas, distancia entre ejes.
6. Información sobre pago de permisos: UTM del mes, pesos a pagar.

Además, cuando el peso bruto total (PBT) se encuentre entre 70 y 100 toneladas se debe presentar un listado de los puentes y estructuras que serán recorridos. Cuando el PBT sea mayor a 90 toneladas se debe incluir un letrero especial (descrito en el Manual de Autorización para Transportes Especiales) en la parte trasera del transporte.

Sumado a lo anterior, cuando el PBT supera las 100 toneladas se debe presentar un estudio de ruta y un estudio analizando el paso del vehículo por puentes y estructuras, este último debe ser realizado por un ingeniero civil especialista.

Finamente, cuando el peso bruto total del transporte sea superior las 120 toneladas se debe entregar una boleta de garantía por \$70.000.000 CLP (setenta millones de pesos chilenos) a la Dirección de Vialidad con el objetivo de cubrir eventuales daños a causa de este transporte.

3.2.5. Consideraciones para transporte de prefabricados pesados.

Para finalizar el capítulo se propone un listado de consideraciones o recomendaciones que, a juicio del autor, ayudan al buen desarrollo y planificación del transporte de elementos prefabricados de hormigón para la construcción en faenas mineras.

- Como punto fundamental se debe estudiar y aplicar la normativa legal para el transporte de cargas (Ley de tránsito, DS MOP N° 158 de 1980, RES MTT N°1 de 1985, etc.)
- Verificar la existencia de restricciones sobre la carga y el uso de infraestructura pública (caminos) a través del Ministerio de Obras Públicas y la Dirección de Vialidad.
- Realizar recorrido por la ruta que seguirán los elementos prefabricados (plantas, acopios, faena) y fotografiar, anotar y registrar la ruta que los conductores deberán seguir.
- Verificar que cada equipo de transporte, herramienta y maquina tenga sus mantenencias y certificaciones que le permitan el tránsito por caminos públicos y también el ingreso al recinto minero, recordando que para este último se deben cumplir exigencias especiales de seguridad (reflectantes, barras antivuelco, etc.).
- Identificar de forma fidedigna las dimensiones y peso del transporte cargado y verificar que no se tiene interferencia con la infraestructura presente en la ruta a seguir como lo podría ser sobrepasar resistencia de puentes, dimensiones de túneles o pasos bajo nivel.
- Conocer los puntos de izaje y amarre designados en el diseño para dar una correcta manipulación a cada pieza prefabricada.
- Planificar la estrategia de transporte de tal forma que no sea necesario pasar por un acopio en faena, esto es, descargar el elemento en el momento preciso para su montaje. Esto ayudará a reducir el espacio necesario en faena y los equipos de izaje necesarios.
- Considerar la orientación de las piezas prefabricadas al ser transportadas, pues si se considera la estrategia del punto anterior una orientación correcta de la pieza puede disminuir el número de movimientos (izaje) a realizar previo a su montaje, resultando en una disminución de tiempos y disminución de riesgos por el movimiento de elementos pesados.
- Tener claridad de los horarios de acceso, de entrada y salida al recinto minero y así evitar la sobreestadía de los transportes en faena.

Los puntos anteriormente presentados se entregan de la forma más general posible para que puedan ser aplicados en cualquier proyecto que utilice prefabricados pesados

de hormigón en minería. Lo anterior, sin perjuicio de que cada proyecto tenga características especiales que impliquen agregar o quitar consideraciones de la lista.

3.3. Montaje de elementos prefabricados.

En este capítulo se busca analizar las áreas claves para la planificación y coordinación del montaje de elementos prefabricados pesados de hormigón en obras civiles en proyectos mineros, de tal forma que permitan proponer procesos de montaje más seguros y con una productividad apropiada y así dar cumplimiento a los objetivos de esta parte del proceso.

Para esto es necesario reconocer que la planificación del montaje debe comenzar desde fase temprana, en la etapa de ingeniería, pues muchas de las decisiones tomadas en diseño pueden tener efecto directo en el montaje de los elementos.

Al igual que para los capítulos anteriores, este capítulo se enfoca en los elementos prefabricados de tipo 3 y 4, pues debido a sus características, los elementos de tipo 1 y 2 son de uso genérico, de menores dimensiones y peso, por lo que no requiere mayor análisis.

3.3.1. Equipos de izaje utilizados para montaje de prefabricados pesados.

Debido a la gran cantidad de equipos existentes en el mercado para llevar a cabo izaje de elementos pesados es necesario conocerlos y saber cuáles podrían resultar útiles en construcciones en faenas mineras y en que ocasiones.

De esta forma equipos de uso más común como grúas horquilla, camiones pluma y grúas torre quedan fuera de este capítulo, pues sus capacidades de levante y/o radio de acción no serán suficiente para llevar a cabo el montaje de elementos prefabricados pesados en construcciones en minería.

Para lograr el montaje de elementos pesados se debe recurrir a las grúas pluma autopropulsadas, estas corresponden a equipos de gran capacidad y con distintas configuraciones de pluma y de tracción (neumáticos u orugas) que logran capacidades de levante de más de 400 toneladas. A continuación se analiza en profundidad este elemento tan importante en el montaje de prefabricados pesados de hormigón.

3.3.1.1. Grúas autopropulsadas

Las grúas autopropulsadas son sistemas de izaje que van sobre un chasis que permite el desplazamiento de la grúa por sí sola, entregando versatilidad y capacidad de adaptación al terreno. Si bien es cierto poseen la capacidad de desplazarse de forma autónoma no están diseñadas para moverse grandes distancias, es por ello que su traslado se realiza sobre camiones con camas bajas especiales.

Este tipo de grúas posee una mayor capacidad de levante frente a otras soluciones, siendo posible encontrar en Chile grúas con capacidades superiores a 600 toneladas y en el mundo grúas con capacidad de 3000 toneladas (referencia grúa [Liebherr LR13000](#)).

Este tipo de grúas pueden tener chasis con rodado neumático o montado sobre orugas, siendo las montadas en oruga las que poseen mayor capacidad de levante pero menor movilidad que las de rodado neumático.

Otro elemento a considerar es la pluma, que puede ser telescópica o de celosía. A continuación, en la Figura 36 se presentan el montaje de un muro prefabricado en hormigón de 75 toneladas de peso con una grúa autopropulsada, telescópica y montada sobre rodado neumático.



Figura 36: Montaje de muro prefabricado de 75 toneladas (tomada por alumno).

Por su parte en las fotografías presentadas en la Figura 37 se puede observar el montaje de muros prefabricados de 35 toneladas, utilizando una grúa montada en oruga con pluma de celosía.



Figura 37: Montaje de muro prefabricado de 35 toneladas (tomadas por alumno).

Un punto esencial que se debe tener en consideración cuando se trabaja con equipos de gran tonelaje es la transmisión de esfuerzos al suelo, los cuales deben estar verificados. Es común que se utilicen elementos denominados almohadillas, que transmiten y distribuyen los esfuerzos desde los estabilizadores de la grúa al terreno.

Las almohadillas poseen mayor área en contacto con el suelo que los estabilizadores de la grúa por lo tanto el esfuerzo se reparte en una mayor área y no se concentra en un solo punto del terreno, evitando así sobrepasar la resistencia del terreno. Se debe verificar que la almohadilla se encuentre completamente plana con el suelo.

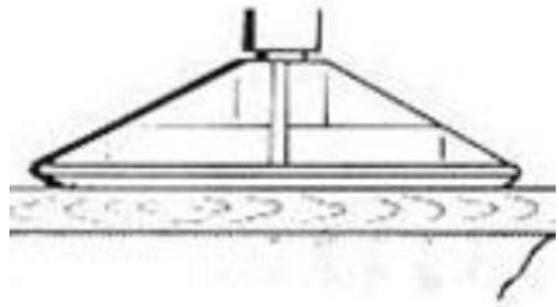


Figura 38: Almohadilla para estabilizador de grúa.

Cuando se utilizan elementos de transmisión de carga como las almohadillas estos deben ser verificados e incluidos en los cálculos realizados en el plan de izaje o rigging plan. En la sección 3.3.2.2 se revisará el contenido del plan de izaje, que es de carácter obligatorio para realizar izaje de elementos pesados en la industria minera.

3.3.2. Procedimiento de montaje

La cantidad de configuraciones de elementos prefabricados (geometrías, puntos de izaje, tipo de conexión, etc.) será tan variada como proyectos existan, por ende, cada proyecto deberá definir sus procedimientos a seguir para obtener un montaje seguro y eficiente.

Aun considerando lo anterior, se puede definir una serie de lineamientos generales que podrían ser aplicados a cualquier proyecto que conlleve el uso de prefabricados pesados en faenas mineras y de esta forma establecer un punto base de partida para el desarrollo y planificación del montaje.

A continuación se presenta una serie de recomendaciones generales que pueden servir como buenas prácticas para el montaje de elementos prefabricados pesados, estas recomendaciones se establecen sin perjuicio de que cada proyecto debe evaluar la conveniencia y aplicabilidad de estas.

- Se debe conocer que punto de izaje corresponde a uno temporal (utilizado para montaje, luego se retira) o uno permanente (queda en el elemento, probablemente el prefabricado será reutilizado en otro proyecto). Ver Figura 39.
- En todos los elementos prefabricados pesados se debe conocer el centro de gravedad, respetando el uso de los puntos de izaje establecidos en el diseño, con el fin de mantener la pieza siempre en equilibrio. En imagen de la derecha en la Figura 41 se puede observar que el centro de gravedad viene indicado en los planos de montaje.
- El elemento prefabricado debe estar en todo momento estable, en caso de tener geometría especial se deben establecer elementos que aseguren su estabilidad.
- Bajo ningún punto obviar las consideraciones establecidas por diseño, por ejemplo, el uso de vigas de levante para elementos alargados y esbeltos
- Se debe proteger tanto el prefabricado como los elementos de izaje externos. Por ejemplo, evitar que las eslingas queden en contacto directo con un borde del elemento prefabricado, pues este puede contar la eslinga generando la caída del elemento.
- Respetar en todo momento los ángulos de izaje establecidos por el diseño estructural y por los cálculos realizados en el plan de izaje.



Figura 39: Corte de punto de izaje luego de montaje (tomada por alumno).

3.3.2.1. Secuencia de actividades a considerar

Al igual que en los capítulos anteriores, resulta útil definir una secuencia de actividades que permitan conocer de forma global como se lleva a cabo el montaje de los elementos prefabricados pesados. Esta secuencia es continuación de la etapa de transporte revisada en el capítulo anterior.

El montaje de elementos prefabricados pesados debe estar formalizado como un procedimientos de trabajo del proyecto, dejando en claro las responsabilidades de los participantes en cada ocasión. A continuación, en la Figura 40, se presenta la secuencia de actividades generales a considerar en el montaje de elementos prefabricados pesados de hormigón:

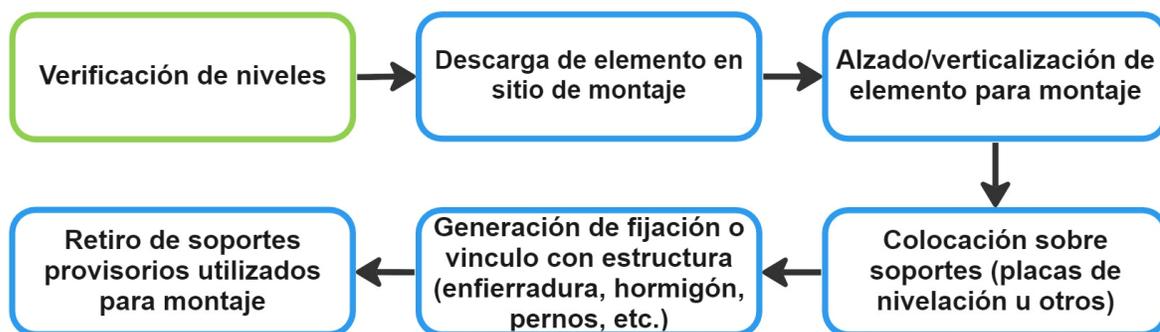


Figura 40: Secuencia de actividades a considerar para montaje de prefabricados pesados.

Es muy importante que previo a que el elemento prefabricado sea llevado a faena, específicamente a la zona de montaje, se hayan verificado las cotas y niveles de donde será instalado. En la sección 3.3.2.3 se habla de la importancia de esto y como lograrlo.

3.3.2.2. Plan de izaje

Para llevar a cabo el montaje de un elemento pesado dentro de una faena minera se tiene como exigencia la elaboración de un plan de izaje (rigging plan) donde se respalde la maniobra en base a cálculos respecto a las condiciones que se tienen, por ejemplo, características del elemento a montar, la grúa utilizar, condiciones de suelo, condiciones climáticas (viento), galibo de la maniobra, etc.

Según la configuración de la pieza prefabricada a montar se deben realizar uno o más planes de izaje, pues por ejemplo, la pieza puede disponer de distintos anclajes, unos para la carga y descarga del transporte y otros anclajes para el montaje. En la Figura 41 se puede observar una configuración de izaje para carga/descarga y otra para el montaje, en ambos casos es necesario generar un plan de izaje pues las condiciones varían.

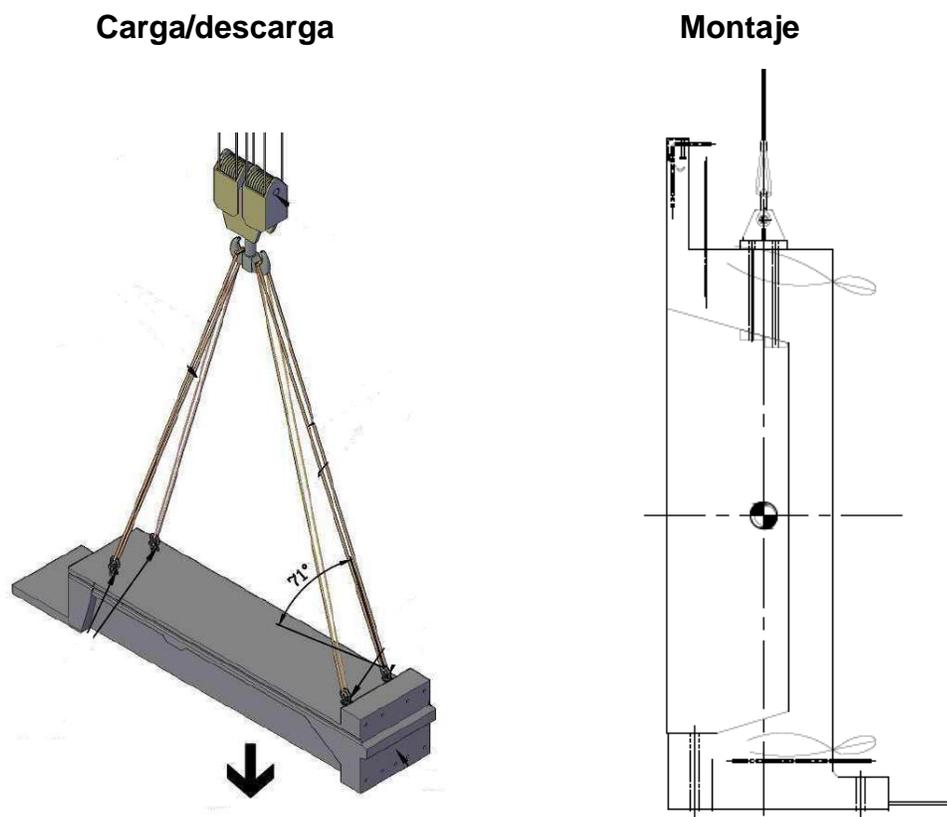


Figura 41: Diferentes configuraciones según el izaje de la misma pieza prefabricada.

(Ver montaje en Figura 37)

El plan de izaje entrega como resultado la grúa a utilizar, los elementos que se utilizarán en la maniobra y todas las consideraciones técnicas del izaje. A continuación se presenta un listado de elementos que deben ser definidas por el plan de izaje para llevar a cabo la maniobra:

- Ángulos de izaje para el elemento prefabricado, siguiendo recomendaciones de diseño.
- Plano de montaje, indicando galibo de la maniobra y posibles interferencias.

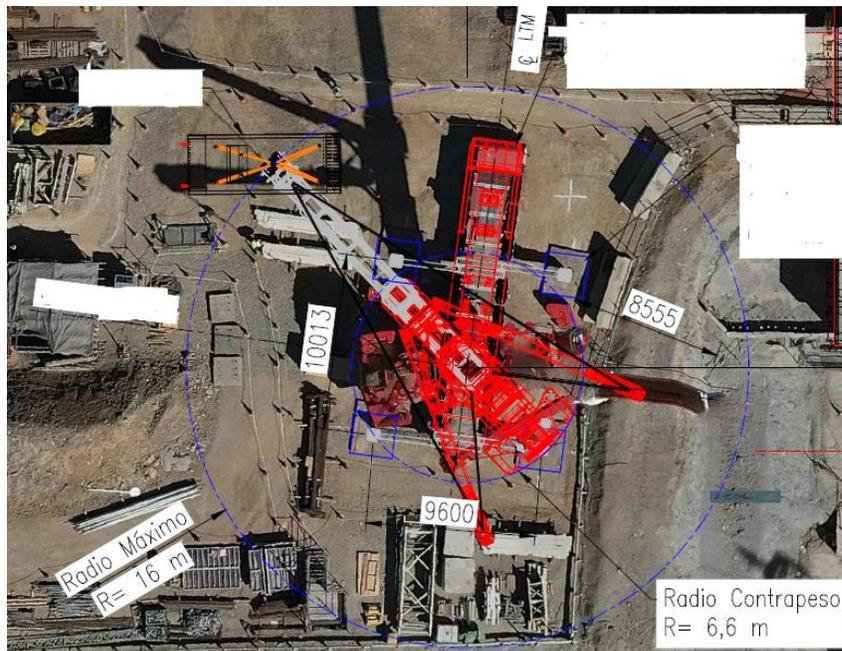


Figura 42: Ejemplo de vista en planta con gálbo de la maniobra.

- Velocidad máxima admisible del viento para realizar la maniobra.
- La capacidad admisible mínima que debe tener el suelo donde se posiciona la grúa, indicando si es necesaria la utilización de *crane mats* o algún otro elemento para distribuir las presiones del montaje sobre el suelo.
- Grúa a utilizar, apertura de estabilizadores, uso de almohadillas y sus dimensiones.
- Se debe indicar extensión de la pluma y radio de funcionamiento del izaje, además del radio máximo y mínimo que puede utilizarse en la maniobra.
- Aparejos a utilizar, su configuración y sus capacidades.
- Memoria de cálculo respaldando lo indicado.

3.3.2.3. Consideraciones pre y posmontaje.

Para que el montaje de elementos prefabricados pesados en faenas mineras sea llevado a cabo de forma exitosa se debe tener una serie de consideraciones alrededor de la actividad misma del montaje.

Así por ejemplo, los elementos con uniones húmedas y uniones secas (tipo 3 y tipo 4 respectivamente) requieren de actividades posteriores a su montaje, como lo puede ser el vaciado de hormigón in situ, la instalación de enfierradura, colocación de pernos, postensado de cables, etc.

Es por lo anterior que el control de las cotas y niveles mediante topografía se hacen esenciales en el uso de elementos prefabricados. Una variación en las cotas y niveles de

diseño puede generar que, por ejemplo, la enfierradura in situ no se pueda instalar en su lugar o que pierda recubrimiento, lo mismo ocurre con las uniones secas como pernos.

Debido a que el hormigón es un material rugoso, es necesaria la utilización de elementos que permitan generar una superficie totalmente plana y de esta forma obtener el nivel exacto al cual debe ser instalado el elemento prefabricado. Uno de los elementos más utilizados para esto son las llamadas placas de nivelación, las que corresponden a placas de acero y permiten que el elemento pueda ser montado en el nivel exacto.



Figura 43: Instalación de placa de nivelación para cajón prefabricado. (tomada por alumno)

Se recomienda que se verifiquen los niveles mediante topografía pre y posmontaje de cada estructura prefabricada, pues retirar una pieza ya instalada para corregir cotas implica un alto uso de recursos, considerando además que la grúa a utilizar es de alto tonelaje y tanto el operador como el rigger son personal altamente capacitado y por ende, tienen un alto costo para el proyecto. Agregando además que realizar un retrabajo puede demostrar falta de planificación, conocimiento y/o poca seriedad en el proceso.

Así por ejemplo, para una configuración de muros, vigas y losas prefabricadas se debe seguir las verificaciones de niveles mostrados en la Figura 44.

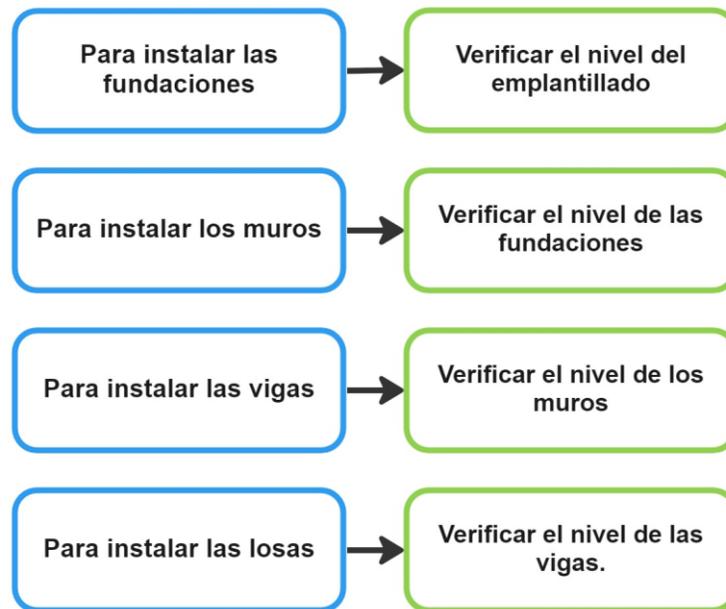


Figura 44: Verificaciones de nivel en montaje.

En elementos con uniones húmedas y una vez verificadas todos los niveles se instala la enfierradura en obra, los moldajes y se procede a hormigonar la unión, el hormigón a utilizar debe ser de la misma resistencia o superior a la de los elementos prefabricados.

Otro caso que puede ser en la construcción es cuando se deben montar elementos de gran peso y tamaño, como lo pueden ser vigas, estos montajes pueden requerir soluciones especiales como el montaje en tándem, lo que implica el uso de dos grúas a la vez para su instalación, convirtiendo la coordinación entre las dos grúas un elemento crítico, pues si una grúa hace un movimiento equivocado puede inducir cargas más allá de las soportadas para la configuración de la otra grúa, pudiendo resultar, en los casos más graves, en un volcamiento de la grúa y/o caída de la carga.

Luego, debido al alto uso que tienen en Chile, resulta importante considerar el caso de estructuras en base a sistemas postensados. Los sistemas postensados son utilizados en estructuras que deben ser moduladas en partes para lograr su transporte y después ser unidas en terreno, un ejemplo de aplicación de esto en faenas mineras es la construcción de espesadores.

Sumado a las dificultades de izar elementos prefabricados pesados se suma el hecho que se debe controlar en obra el tensado por cada ciclo o modulo instalado. Llegando al punto de requerir personal experto y especializado en este tipo de soluciones prefabricadas.

4. Conclusiones y comentarios.

Se logra analizar las principales características de las etapas de fabricación, transporte y montaje de elementos prefabricados pesados de hormigón en faenas mineras. A partir de este análisis se obtiene la presente memoria de título, que es una propuesta de etapas y elementos a considerar y que puede ser utilizada como una guía general para conocer las particularidades de las etapas en el uso de estos elementos, que va al alza en proyectos de construcción en minería, y también se obtienen lineamientos y buenas prácticas a considerar en las diversas etapas del proceso.

A continuación, en la Figura 45, se presenta un esquema con las etapas generales que se requieren para un elemento prefabricado pesado, desde su fabricación hasta el último paso del montaje. Siendo el color azul fabricación, el morado transporte y el color verde montaje.

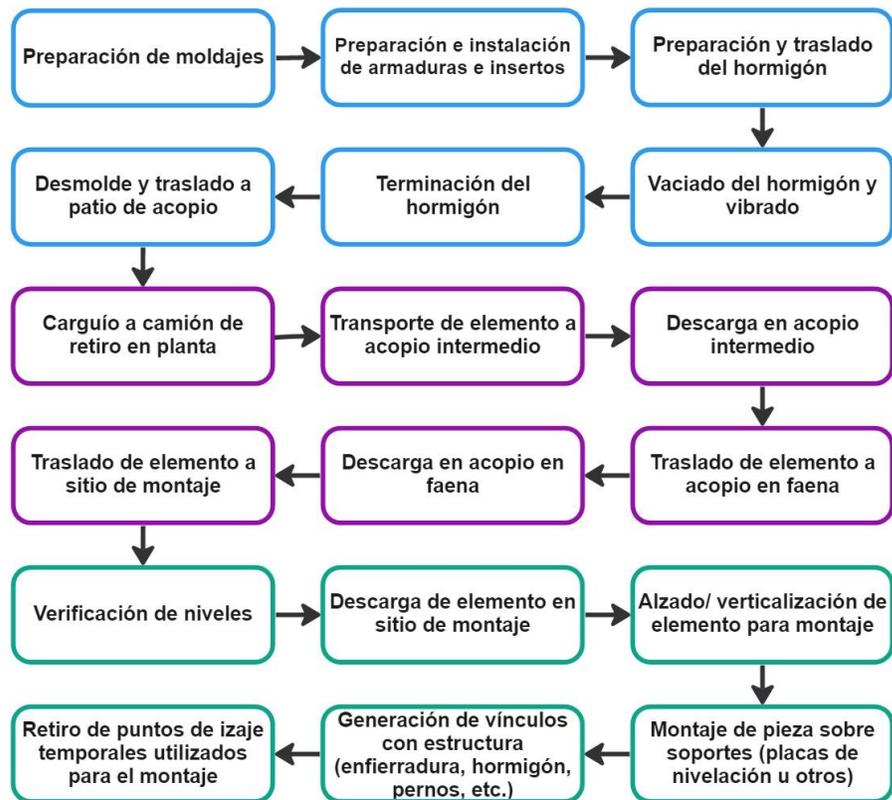


Figura 45: Etapas generales para un elemento prefabricado pesado.

Si bien es cierto, la idea principal de esta memoria es proponer etapas y equipos en el uso de los elementos prefabricados pesados en la industria minera, durante el desarrollo e investigación fue posible notar que parte de las etapas y buenas prácticas descritas pueden ser aplicables a construcciones o proyectos que sean desarrollados en un entorno distinto al minero, con las respectivas diferencias y estándares que tiene un proyecto minero a uno desarrollado en la ciudad, por ejemplo.

A partir de lo investigado para desarrollar este trabajo de título se puede establecer que el uso de elementos prefabricados pesados de hormigón en faenas mineras requiere asegurar un trabajo colaborativo y transversal de todos los agentes y profesionales involucrados (ingeniería, moldajes, prefabricación, transporte y montaje) en el proyecto, de esta forma reducir costos, reducir plazos, mejorar el flujo de la información, mejorar la calidad de la información, disminuir variaciones y errores en el desarrollo de la obra.

Bajo la idea del párrafo anterior, se debe buscar potenciar la planificación, cooperación y coordinación en los proyectos. Para lograr estos objetivos se debe promover e incorporar el uso de sistemas de gestión de datos BIM (planos 3D, costos, tiempos) y de esta forma facilitar flujo de información respecto al diseño estructural, fabricación, logística y montaje de los elementos prefabricados pesados de hormigón entre los distintos agentes del proyecto.

5. Bibliografía

1. Manual de carreteras Vol 3, Dirección de Vialidad, MOP-Chile, edición 2022.
2. Manual de carreteras Vol 4, Dirección de Vialidad, MOP-Chile, edición 2022.
3. Module Assembly Framework, A Best Practices Guideline, Construction Owners Association of Alberta, V2.0, 2017.
4. ACI-318.(2019). Building code requirements for structural concrete, American Concrete Institute, 2019.
5. Instituto Nacional de Normalización. (2016). NCh 170Of.2016 : Hormigón: requisitos generales (NCh 170). Santiago, Chile.
6. Instituto Nacional de Normalización. (2021). NCh3619Of.2021 : Reglas comunes para productos prefabricados de hormigón (NCh3619). Santiago, Chile.
7. Instituto Nacional de Normalización. (2003). NCh2369Of.2003 : Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales (NCh2369). Santiago, Chile.
8. MOP, Dirección de Vialidad (2018). Manual de autorizaciones para transportes especiales- Sobrepeso y/o sobredimensión. Santiago, Chile.
9. ICH (Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón) (2020). Prefabricación de hormigón en minería: Soluciones resistentes y concretas. Santiago, Chile.
10. ASME B-30 American Society of Mechanical Engineers. Crane & lifting device standart (USA), 2019.
11. ACI ITG-7-09.(2009). Specification for Tolerances for Precast Concrete. American Concrete Institute, 2009.
12. Decreto Supremo 158 MOP (1980). Fija el peso máximo de los vehículos que pueden circular por caminos públicos. Santiago, Chile.
13. Decreto Supremo 414 MOP (2015). Complementa DS158-MOP. Santiago, Chile.
14. Decreto Supremo 19 MOP (1984). Especificaciones y exigencias para vehículos que excedan los pesos máximos permitidos. Santiago, Chile.
15. Codelco (2021). Producción de moldajes y fabricación de elementos prefabricados. Santiago, Chile.
16. Safe and simple transportation of large-scale precast elements. < https://www.bft-international.com/en/artikel/bft_2012-05_Safe_and_simple_transportation_of_large-scale_precast_elements_1422377.html >

17. Transporte en Carretera de Elementos Prefabricados: Un desafío a la productividad < <https://www.cdt.cl/transporte-en-carretera-de-elementos-prefabricados-un-desafio-a-la-productividad/> >
18. Guía técnica ANDECE, Estructuras Prefabricadas de Hormigón. < http://www.andece.org/images/BIBLIOTECA/guia_tecnica%20estructuras%20prefabricadas_hormigon_andece.v1.pdf >
19. Equipos disponibles para transporte de cargas pesadas en Chile. < <https://tremac.cl/equipos-especiales/> >