

PREFABRICACIÓN, PREENSAMBLAJE, Y MODULARIZACIÓN (PPM): UN ENFOQUE INTEGRAL DE CONSTRUCTABILIDAD

Por V. A. Ghio, M. Campero, L. F. Alarcón

Se discuten los aspectos teóricos así como las herramientas necesarias para impulsar programas integrales/masivos de prefabricación, preensamblaje y modularización (PPM) durante la construcción de proyectos de edificación, obras civiles así como montajes industriales. Aunque la prefabricación de ciertos elementos de construcción es frecuente en proyectos de construcción en América Latina, la utilización de estrategias masivas de PPM es escasa. Estas estrategias van conectadas con un enfoque de constructabilidad⁺, el cual deberá ser adoptado desde las etapas iniciales del proyecto. Los ahorros obtenidos debido a la aplicación integral del PPM son significativamente mayores que aquellos obtenidos con enfoques tradicionales. Se presentan diversos ejemplos de proyectos a nivel internacional en donde se han obtenido ventajas substanciales mediante la aplicación del PPM. Asimismo, se discuten las desventajas y requerimientos adicionales asociados con el PPM.

INTRODUCCION

La prefabricación por sí sola no lleva una connotación innovadora dentro del enfoque convencional que tiene en los proyectos de construcción que conocemos. Sin embargo, en este artículo se analizan los conceptos de estrategias masivas e integrales de aplicación de la combinación de estos tres conceptos (prefabricación, preensamblaje y modularización), la cual se denominarán de aquí en adelante como PPM. Las estrategias masivas de PPM pueden generar ahorros en los costos y plazos de construcción, los cuales son substancialmente mayores a los ahorros obtenidos mediante la aplicación parcial de la prefabricación en nuestras obras. Para que estos ahorros se materialicen es necesario que se utilicen procedimientos específicos desde las fases iniciales del proyecto. Estos procedimientos se resumen y discuten en este artículo.

Como en la mayoría de los desarrollos de ingeniería de construcción, la aplicación de un programa integral de PPM nace como respuesta a necesidades reales de los procesos constructivos. Entre estas podemos citar:

- (a) Restricciones del sitio: En algunos casos, la construcción de un determinado proyecto ofrece características de

inaccesibilidad, lo cual limita el transporte y acceso de cantidades importantes de personal y equipos;

- (b) Restricciones de mano de obra: Es frecuente que el lugar escogido para la construcción de obra civiles o industriales se encuentre alejado de centros urbanos. En estos casos la mano de obra, en general, tiende a escasear, lo cual es especialmente complicado en el caso de la mano de obra calificada, como es el caso de los soldadores;
- (c) Restricciones de tiempo: Existen trabajos que sólo pueden ejecutarse en lapsos de tiempo muy cortos, los cuales quedan determinados, por ejemplo, por niveles de agua bajos (estiajes), canales de riego sin agua, etc. La posibilidad de anticipar parte de los trabajos fuera de la obra hará más eficiente el uso del tiempo crítico.
- (d) Restricciones del medio ambiente: Debido a problemas de altitud, temperatura extremas, etc., no es factible o conveniente realizar la operaciones de construcción en el sitio;
- (e) Restricciones/Beneficios del proyecto: Es cada vez más usual que los mandantes de los proyectos procuren que sus proyectos se terminen en el menor tiempo posible. Esto, por lo general, tiene por objeto adelantar la etapa de producción del proyecto.

La aplicación de una política de PPM es una forma de responder a estos requerimientos y permite lograr los siguientes objetivos:

- Disminuir plazo de construcción por efecto de adelantar la ejecución de una parte de la obra que, de otra manera, debe esperar a que se cumpla la secuencia de trabajo tradicional.
- Posibilitar el desplazamiento de horas hombre (HH) hacia talleres en centros poblados, con economía de campamentos y movilización.
- Paliar el efecto de condiciones desfavorables en el lugar de la obra (clima, altura, etc.).
- Aprovechar las ventajas en calidad, productividad, costo, y reducción de riesgos que se pueden obtener en un taller especializado.
- Limitar, en gran medida, la actividad construcción en áreas remotas o inaccesibles, a montajes de elementos preensamblados, minimizando el personal de construcción in situ.

Para homogeneizar los criterios y los conceptos que serán discutidos en este artículo, a continuación se presentan

⁺ Constructabilidad se define como el uso óptimo del conocimiento y experiencia de la construcción en la planificación, diseño/ingeniería, abastecimiento, y operaciones de terreno para asegurar los mejores resultados generales del proyecto. Constructabilidad resume en una palabra los conceptos de "construcción" y "habilidad", es decir, habilidad de construir óptimamente.

las definiciones de los términos más importantes a tratar:

Prefabricación: Fabricación de una parte de la estructura final en un sitio diferente al de su posición definitiva. Este trabajo puede hacerse en el taller matriz del fabricante, en un taller cercano a la obra, o al pie de obra. Esta estructura parcial es transportada a su lugar definitivo para que, junto con otras, armen el total. Preensamblaje y modularización son extensiones del concepto de prefabricación. Estos tres conceptos difieren en el grado de terminación de las piezas, y de la magnitud del trabajo en el sitio necesario para instalar las mismas (Tatum, et al, 1987).

Preensamblaje: El proceso de prefabricación de una unidad compuesta de varios elementos prefabricados.

Modularización: Es el proceso que termina por dar origen a una unidad o módulo funcional completo, que comprende estructuras, equipos, instrumentos y terminaciones, de tal modo que, en la práctica, está en condiciones de ser trasladada a su lugar final para ser conectada al sistema.

Para promover la utilización de estrategias masivas e integrales de aplicación de procesos de prefabricación, preensamblaje y modularización (PPM) en proyectos de construcción es necesario cambiar la naturaleza del diseño y construcción del proyecto, y se requiere de un mayor esfuerzo de planificación, control y organización. Adicionalmente, es necesario que la decisión de adoptar el PPM se tome a una edad temprana en el proyecto. Esta decisión tiene una serie de ramificaciones que modifican la manera convencional en que se desarrollan los procesos constructivos. Una manera muy eficiente de controlar estos aspectos es adoptar un enfoque de constructabilidad, dentro del cual se enmarcará la estrategia de PPM. Algunos aspectos de constructabilidad y su relación con el PPM son discutidos más adelante en este artículo.

EXPERIENCIA INTERNACIONAL CON PPM

A nivel internacional es cada vez más frecuente que en proyectos de obras civiles e industriales los contratistas de ingeniería y construcción incluyan un cierto nivel de PPM como alternativa a los métodos de construcción tradicional. Quizás la mejor manera de promover nuevos enfoques de ingeniería de construcción es mediante la divulgación de ejemplos y experiencias exitosas de aplicación de un

determinado enfoque. Por lo tanto a continuación presentamos algunos casos obtenidos de la vasta literatura relacionada con el PPM, en los cuales se incluye las ventajas y desventajas de los mismos. En estos ejemplos, el concepto de prefabricación está relacionado con elementos de hormigón, mientras que los conceptos de preensamblaje y modularización están relacionadas a estructuras de acero, equipos y piping.

a. Preensamblaje y Modularización: Zambon (1982) resume las características principales de cinco proyectos en donde se usaron políticas masivas de PPM (ver Tabla 1)

- 1) El factor común en estos cinco casos fue la necesidad de reducir la importación masiva de mano de obra, lo que generó la necesidad de trasladar porciones de la construcción hacia ubicaciones más favorables. El traslado de mano de obra hacia otros sitios varió en un rango de 20-62% del total estimado. Se estimó que el acumulado de horas hombre ahorradas por medio de una mejora en la productividad de la construcción en sitios con condiciones de trabajo más favorables, así como el ahorro en construcción de instalaciones provisionales para el personal fue de aproximadamente seis millones de HH, y se eliminaron instalaciones provisionales para 6,500 trabajadores. El rango de reducción de tiempos en estos cinco proyectos fue de 6-36%. En todos los proyectos se obtuvieron ahorros totales de costos.

Otros autores, como Kliewer (1983), han reportado ahorros en los costos totales de construcción del orden de 8-10%, aunque advierten que los costos de ingeniería de diseño y construcción generalmente se incrementan en un 15%. El efecto en el traslado de mano de obra a sitios más favorables puede llegar a ser del orden de 50%. Whitaker (1984) también resume algunas experiencias del uso de preensamblaje. En la construcción de una pequeña planta de procesos, se preensambló la mayor parte de la misma, obteniéndose una reducción en el tiempo de construcción de tres meses (15%), y una reducción aproximada en los costos del 10%. De la misma forma, en la construcción de una pequeña planta piloto, donde la mayor parte de las estructuras de acero fueron preensambladas y transportadas al sitio (la construcción de las fundaciones y el montaje de la instrumentación fueron hechos en sitio), se obtuvieron ahorros del orden del 20% tanto en los costos como en los tiempos de construcción. Whitaker afirma que es común que en proyectos en donde se

Tabla 1-Cinco Casos de Utilización Masiva de Modularización

| | Oriente Medio | Norte América | Norte América | Norte América | Nueva Zelanda |
|------------------|----------------------|----------------------------------|--------------------------------------|------------------|----------------------------------------|
| Tipo de Proyecto | Planta Petro-Química | Extracción de Petróleo de Arenas | Planta de Tratamiento de Agua Salada | Planta Petrolera | Planta de Conversión de Gas a Gasolina |
| Costo Total | US\$ 1 Billón | US\$ 13 Billón | US\$ 0.3 Billón | US\$ 0.3 Billón | US\$ 1 Billón |

preensamble sólo ciertas porciones de las estructuras, se puedan obtener traslados de mano de obra en el rango de 10-15%.

b. Prefabricación: La prefabricación, que por lo general está ligada al material hormigón (u otros materiales que

c. Resumen de Beneficios Potenciales: En esta sección se resumen los valores típicamente encontrados en proyectos donde se han aplicado estrategias masivas de PPM. Algunos de los rangos más típicos se resumen a continuación:

- Ahorros totales en costo 10-20%

Tabla 2. Resumen de Experiencia Internacional con PPM Para la Construcción de Obras Civiles/Industriales, así como de Edificación

| TIPO DE ESTRUCTURA | Prefabricación | | Preensamblaje | Modularización |
|--------------------------------|----------------|----|---------------|----------------|
| | 2D | 3D | | |
| ESTRUCTURAS DE ACERO | | | | |
| Estructuras Livianas | √ | | | |
| Estructuras Pesadas | √ | √ | √ | √ |
| Edificios de Gran Luz | √ | | | |
| Estanques | | √ | √ | √ |
| Chimeneas | | √ | √ | |
| Estructuras Menores | √ | √ | √ | |
| Estructuras de Concreto | | | | |
| Fundaciones | | √ | | |
| Muros | √ | √ | | |
| Refuerzo | √ | √ | | |
| Estructuras Menores | √ | √ | | |
| EQUIPO | | | | |
| Equipo Mecánico | | | √ | √ |
| Equipo Eléctrico | | | √ | √ |
| PIPING | √ | √ | √ | |

2D: Estructuras Planas; 3D: Estructuras tridimensionales

generalmente se construyen en el sitio), tiene una serie de aplicaciones en proyectos de edificación, donde podemos mencionar desde pequeños elementos prefabricados, pasando por muros, vigas y columnas, hasta elementos más voluminosos y pesados. En la construcción de obras civiles e industriales, también existe un alto potencial de prefabricación de elementos de fundación, muros, y otros elementos. En principio, en este tipo de PPM, la ventaja está centrada en la reducción de tiempos de construcción lo cual recae finalmente en menores costos indirectos, y reducciones finales de los costos totales del proyecto.

- Ahorros totales en tiempo 6-30%
- Mano de obra desplazada a otro sitio 8-56%

La Tabla 2 resume los tipos de estructura con los enfoques de PPM más recomendados para cada uno, con respecto a la experiencia internacional. Otros beneficios se encuentran en mejores productividades y mayor calidad del trabajo en una fábrica de producción de elementos, comparada con la construcción in situ. Se reduce la necesidad de instalaciones provisionales en el sitio, debido al desplazamiento de parte de la mano de obra a la fábrica de elementos y módulos. También se reduce el efecto del clima,

y los riesgos del trabajo en altura mediante la construcción tradicional en sitio. Por otra parte, se debe considerar que en proyectos con uso intensivo de PPM se espera en general un mayor costo en horas de ingeniería, de adquisición de materiales, equipos y módulos, así como en el transporte de los mismos. El costo total es por lo general menor que para proyectos contruidos con tecnologías de construcción tradicionales. Sin embargo, en muchos casos los principales beneficios son indirectos y provienen de la puesta en marcha temprana de la instalación, lo que trae consigo una llegada temprana al mercado de los productos, anticipación de utilidades, reducción de costos financieros, etc. En estos casos, la utilización de PPM puede resultar conveniente aún cuando el costo directo sea mayor que la construcción tradicional.

EJEMPLO DE PPM EN EL PROYECTO EL ABRA

Este proyecto fue realizado por el consorcio entre Sigdo Koppers y Bechtel, y consistió en la ejecución de todas las instalaciones para el tratamiento del mineral de cobre y las obras anexas. Estas consisten en el Chancador Primario, Correa Transportadora de Mineral (14 Kilómetros), Stock Pile, Chancadores Secundario y Terciario, de Lixiviación en Pilas, planta de Extracción por Solventes, Estanques y Electrobtcención. Todas las obras anexas, como subestación, edificios, infraestructura, etc., también fueron ejecutadas por el consorcio.

El Proyecto El Abra es un ejemplo exitoso de un programa de construcción prefabricada sin precedentes en nuestro medio, desarrollado con ingeniería chilena. En él se combinan elementos prefabricados comprados en el extranjero, elementos prefabricados producidos en una planta de prefabricación en Calama (a una hora de distancia de la obra), así como elementos prefabricados y prearmados in situ. El éxito del proyecto se fundamenta en un proceso de ingeniería de construcción muy temprano (6 a 8 meses antes de lo normal), donde se estudió y optimizó el proceso de prefabricación. Es importante destacar que el nivel de la ingeniería alcanzada, donde se incluye la prefabricación, permitirá que el proyecto se pueda terminar unos 7-9 meses antes del tiempo total estipulado de 32 meses, lo cual genera un ahorro total de tiempo de aproximadamente 22-28%.

Un Caso Integral de PPM

El caso del proyecto El Abra es de especial relevancia debido a la aplicación completa y exitosa de los conceptos de PPM. A continuación se resumen ejemplos de prefabricación, preensamblaje y modularización desarrollados en El Abra.

1. Prefabricación de Muros y Fundaciones de Hormigón: La prefabricación de elementos de hormigón, que alcanzaban pesos de hasta aproximadamente 30 toneladas, fue conducida en una planta especialmente diseñada para este fin en Calama. El transporte se realizó sobre «zorras» especialmente diseñadas para el transporte del tipo de elementos que se prefabricó. Los elementos de hormigón prefabricado incluyen elementos de acero especialmente

diseñados para ser utilizados como puntos de izaje, así como acero con longitudes adecuadas para asegurar la adherencia de empalme.

2. Prefabricación de Armadura de Refuerzo en Calama: La armadura de refuerzo de los elementos prefabricados de hormigón fue construida de manera modular en el patio de prefabricación de Calama.
3. Prefabricación de Tuberías en Spools: Se prefabricaron las tuberías por spools, en Calama.
4. Prefabricación de Escaleras y Otros Elementos Metálicos: El esfuerzo de prefabricación de Calama incluyó la prefabricación de escaleras así como otras estructuras metálicas menores.
5. Durmientes de la Correa Transportadora: Este tipo de elementos de hormigón también se prefabricó en Calama.
6. Prefabricación de Cajas de Electricidad: Las cámaras eléctricas se prefabricaron en Calama, así como otros elementos menores.
7. Equipo de Propulsión y Freno de Correa Transportadora: Este equipo fue comprado en Alemania, y fue enviado a la obra como módulos o paquetes. Proveedor y montador convinieron los mayores tamaños a transportar.
8. Equipo Eléctrico: Este tipo de equipo fue ordenado al proveedor en forma modular a los Estados Unidos. (Peso de la mayor unidad: 32 ton)
9. Prefabricación de Tuberías Metálicas: Este tipo de estructura fue preensamblada en Calama y transportada a la obra.
10. Estructuras Metálicas Preensambladas en Obra: En el proyecto El Abra, se han preensamblado una serie de elementos metálicos. Muchos de estos llegaron a la obra divididos en pequeños elementos metálicos, los cuales fueron prearmados antes de ser finalmente instalados. Para este fin se consideró un sitio de preensamblaje en terreno.
11. Equipo: Puente Metálico para Repartición de Material en las Piscinas de Lixiviación: Esta estructura metálica fue ordenada desde Seattle, Washington, Estados Unidos, donde fue preensamblada. Fue necesario coordinar con el proveedor para determinar las longitudes de los tramos a transportar prearmados desde los Estados Unidos.

Experiencias en la Producción de Elementos Prefabricados en Calama:

1. La prefabricación, al nivel utilizado en el proyecto El Abra, significó una innovación para Sigdo Koppers, por lo que al principio del proyecto hubo una natural reticencia a utilizar este tipo de construcción.
2. La aplicación de estos nuevos métodos constructivos ha generado un beneficio económico y de reducción de tiempos substancial en el proyecto.
3. Probablemente la mayor innovación fue en la prefabricación de obras civiles.
4. Se prefabricaron muros de hormigón de hasta 28 tons.
5. La prefabricación en la planta de Calama incluyó los siguientes elementos: gran parte de las estructuras de hormigón; cañerías metálicas (spools) y de HDP (high

density polyuretan); escaleras, y otros equipos menores; tuberías de 3.2 metros de diámetro; armadura de refuerzo (ver Tabla 3).

6. Para lograr el nivel de prefabricación obtenido en este proyecto fue necesario utilizar la ingeniería apropiada para la prefabricación.

Tabla 3. Resumen de Cantidades Generales de Elementos Prefabricados del Taller de El Abra

| | |
|--------------------|------------------------|
| MOLDAJES | 29.971 M2 |
| HORMIGON | 5.115 M3 |
| TUNELES-CANALETAS | 487 ML |
| BUZONES DE DESAGUE | 26 UN. |
| CAMARAS ELECTRICAS | 703 UN (TAPAS Y MUROS) |
| DURMIENTES | 164 UN. |
| MUERTOS DE ANCLAJE | 890 UN. |
| TUBERIAS HDPE | 762 ML |
| TUBERIAS SS | 130 ML |
| POYOS | 942 UN. |

Experiencias de la Utilización de PPM en el Proyecto El Abra

1. Una de las principales razones para prefabricar en este proyecto en particular era «bajar» la mano de obra a Calama (se deseaba lograr bajar un 15% de la mano de obra en El Abra). Calama se encuentra a una altura de 2,000 metros, mientras que El Abra alcanza alturas de hasta 4,000 metros.
2. Otra de las razones para prefabricar era la necesidad de lograr una mayor velocidad de construcción.
3. El plazo inicial del proyecto era de 32 meses. Luego del esfuerzo de ingeniería y del grado de prefabricación utilizado, la obra se espera terminar en 23-25 meses (7-9 meses antes que lo estimado).
4. Para incrementar la velocidad de construcción de la obra, los ingenieros de Sigdo Koppers recomiendan que se debe contar con gente de Ingeniería de Construcción trabajando de 6-8 meses de anticipación a la construcción.
5. Fue necesario estudiar qué elementos se debía prefabricar en Calama, cuáles prefabricar en El Abra, y cuáles y con qué grado de terminación, peso y volumen, ordenar del extranjero, de modo de lograr la mejor combinación en cuanto a los costos y tiempo de construcción finales.
6. En general, se recomendó prefabricar al máximo, en tanto el transporte y maquinaria de izaje lo permitiera.
7. Es conveniente diseñar para que se repitan las dimensiones (diseño modular) y así se facilite la prefabricación, es decir, incorporar los conceptos de prefabricación y pre-armado en el diseño.

8. En El Abra, se limitó el peso de las fundaciones prefabricadas a 30 tons, tomando en cuenta las limitaciones de los equipos disponibles. Esto podría variar, tanto para arriba como para abajo, en otros proyectos.⁺⁺
9. Algunos puentes metálicos fueron prefabricados en los Estados Unidos (Seattle).
10. Otros puentes metálicos se prefabricaron a nivel nacional, y en terreno se montaron todas las cañerías.
11. Se realizó un importante trabajo de ingeniería en obra para maximizar el tamaño y peso de las estructuras a prefabricar.
12. El concepto de prefabricación fue concebido desde la creación del proyecto.

CONSTRUCTABILIDAD Y PPM

Es importante hablar de constructabilidad ya que ésta brinda el marco necesario para que las ventajas comparativas que se obtienen al incorporar una estrategia integral de PPM sean realmente aprovechadas, y de esta manera se maximicen los beneficios. Como ya se ha mencionado, para que sea posible lograr los objetivos de mejoramiento deseados se deberán integrar los procesos de diseño y construcción del proyecto. Se necesitará de una mayor y mejor planificación, control y organización. Adicionalmente, será necesario que la decisión de adoptar el PPM se tome a una edad temprana en el proyecto; esta decisión tendrá una serie de impactos que modificarán la manera convencional en que se desarrollan los procesos constructivos. Estos puntos son componentes básicos de la constructabilidad de un proyecto.

Constructabilidad: Aspectos Generales

Aunque es aceptado por muchos profesionales que es beneficioso que se combinen los conocimientos y experiencias de construcción con la planificación y diseño de un proyecto, en la práctica no es frecuente encontrar ingenieros/administradores de la construcción que hayan logrado vencer el reto de hacer converger las culturas de diseño y de construcción. Así es que, debido a la falta de participación de la construcción en las etapas iniciales del proyecto, la evolución del proyecto queda determinada por las decisiones que se tomen durante las etapas iniciales del proyecto, es decir, diseño conceptual y diseño básico. Aunque no se puede negar que los ingenieros de diseño tratan de minimizar los costos, sin descuidar su facilidad constructiva, su preocupación no puede reemplazar el aporte de la experiencia del constructor. Esto se observa, en algunos casos, en diseños que incluyen, por ejemplo, textualmente cientos de tipos distintos de vigas o columnas. El ahorro inicial en optimizar cada elemento de la construcción se traducirá finalmente en excesivos costos de producción, adquisición, almacenamiento y montaje de los elementos. La constructabilidad, en cambio, combina todos

⁺⁺ Un ejemplo menor, pero de gran interés, es el que aplica actualmente la Sociedad del Canal de Maipo para revestir el canal San Carlos en la zona de Providencia. Este trabajo sólo puede hacerse durante las dos semanas anuales que el sistema de riego dispone para la limpieza y mantenimiento de su red de canales. Diseño y construcción se han integrado para prefabricar módulos de hormigón (paramento lateral y solera) de 12 ton c/u.

los criterios de ahorro de forma global de modo de determinar cuales son las decisiones que maximizan a la economía total del proyecto, desde su concepción.

Constructabilidad y su efecto en la estrategia de PPM

La aplicación del concepto de constructabilidad en un proyecto tiene diversas implicaciones, la mayoría de las cuales facilita la incorporación de la estrategia de PPM. A continuación se discuten algunos aspectos relevantes de la constructabilidad, y cómo es que estos influyen en la incorporación de una estrategia integral de PPM (CII 1993-I, Tatum et al 1987):

1. **Participación temprana del equipo de construcción en el desarrollo del proyecto:** La participación del equipo de construcción desde la concepción del proyecto generará que los diferentes métodos constructivos sean evaluados desde el principio del proyecto, evitando así “anclarse” a filosofías de diseño tradicional asumidas sin participación del equipo que finalmente va a materializar la construcción. Esto posibilitará que se estudie y analice una política masiva de PPM, desde las etapas preliminares del proyecto.
2. **Adecuada organización de constructabilidad:** La constructabilidad requiere que se disponga de una estructura organizacional que facilite la incorporación de cambios y de enfoques innovadores en el desarrollo del proyecto. En el caso del PPM, es de fundamental importancia que se cuente con este tipo de estructura.
3. **Política de Contratación:** La forma en que se lleva a cabo la contratación de los diferentes actores del proyecto difiere substancialmente del proceso de contratación convencional en el cual se sigue una secuencia casi lineal de contratación, es decir: diseñador > proveedor > fabricante > construcción > operador. Para asegurar una buena constructabilidad, y que además se incluyan los factores de importancia para el PPM, es necesario no sólo contratar con antelación a la “construcción” y los proveedores, si/no, además, asegurar que los términos contractuales incentiven la nueva forma de trabajo.
4. **Desarrollo de Procedimientos Detallados de Soporte de Constructabilidad:** Los mecanismos mediante los cuales se relacionará el “diseño” con los “equipos” y con la “construcción”, y la creación de procedimientos de aprobación de ideas de constructabilidad, deberá ser determinado en las primeras fases del proyecto. Esto, permitirá el desarrollo y aplicación masiva de los principios del PPM.
5. **Desarrollo de Procedimientos Detallados de Constructabilidad:** El diseño detallado de los procedimientos constructivos a utilizar, así como su optimización en terreno, son fundamentales al utilizar un sistema constructivo innovador. En el caso de la utilización de una gran cantidad de elementos PPM, la planificación y diseño de procedimientos se vuelve vital para asegurar los beneficios de los nuevos métodos constructivos.

EVALUACION DE LA APLICABILIDAD DE PPM

Como cualquier tipo de innovación tecnológica en la construcción, es necesario evaluar la conveniencia de la aplicación del PPM para cada proyecto. Debemos tener en cuenta que la innovación debe ofrecer, con cierto grado de seguridad, que se obtengan los beneficios deseados ya sea en reducción del tiempo de construcción, reducción de los costos, incremento de la calidad, reducción del impacto al medio ambiente, etc. Con este propósito se resume a continuación los criterios de evaluación recomendados por el CII (1993-II).

1. **Identificar y Analizar las Fuerzas para la Aplicación del PPM:** Basado en las necesidades específicas del proyecto, se deberá identificar y analizar tanto las fuerzas internas como externas que impulsarán el uso de un sistema masivo de PPM. Estos factores incluyen: las demandas por reducción del tiempo de construcción; las regulaciones del estado o del mandante; requerimientos especiales de diseño; potenciales ahorros en los costos del proyecto; seguridad; condiciones adversas del sitio; etc.
2. **Determinar y Analizar los Parámetros del Proyecto:** Basado en las necesidades específicas del proyecto, se deberá identificar y analizar diferentes aspectos relativos al funcionamiento interno del proyecto:
 - Se deberán estudiar las **condiciones propias del sitio** en donde se construirá el proyecto. Es decir la disponibilidad de mano de obra y su nivel de capacitación, las posibilidades de transporte y acceso, etc.
 - Será necesario revisar las **regulaciones y restricciones legales**. Para medir su efecto se deberá analizar en detalle los permisos necesarios (i.e., para el transporte de piezas de gran volumen), estimar el impacto de las regulaciones en los costos, investigar las limitaciones en cuanto a pesos permisibles y regulaciones de transporte en general.
 - Es de mucha importancia que se determine lo antes posible dentro del desarrollo del proyecto la **disponibilidad de tecnología** en el país. En principio se deben realizar estudios para determinar cuales son las tecnologías disponibles, así como el estado del arte en países más avanzados. Además, para poder diseñar los métodos constructivos y para que realmente funcionen, se deberá determinar qué equipo se dispone o se puede conseguir en el país, o en dónde se puede ubicar el equipo necesario.
3. **Evaluar Métodos Alternativos de Construcción:** Es importante, además, que en el proceso de evaluación se estimen los efectos de la duración de la construcción del proyecto, así como sus **consecuencias financieras**. La evaluación económica se verá afectada por el sistema constructivo elegido.
4. **Seleccionar Métodos Especiales de Construcción:** Como

resultado del examen anterior, se deberá **optar por una política de construcción** en particular. A este nivel del proceso de evaluación, se deberá realizar una evaluación técnico-económica de los métodos alternativos, considerando el grado de integración del método seleccionado con los del resto del proyecto.

PROCEDIMIENTOS DE IMPLEMENTACION DE UNA POLITICA INTEGRAL DE PPM

1. Desarrollo del Ambiente que favorezca la Implementación de un Programa Integral de PPM/Constructabilidad: Es fundamental para la adecuada implementación del plan que se favorezca la participación temprana del equipo de construcción en el proyecto. Para este fin, es necesario establecer una estrategia adecuada de contratación que vaya de acuerdo con la estrategia de PPM. Por otra parte, la forma usual de organización de la empresa por lo general no está diseñada para adecuarse a la estrategia de PPM. Por lo tanto será necesario crear un equipo de PPM/Constructabilidad para apoyar la implementación del PPM. Adicionalmente, será necesario que, además del equipo de construcción, se conforme un equipo con los proveedores, los diseñadores y los mandantes. Debido al carácter multidisciplinario del equipo, es recomendable que se desarrollen programas de "team building" para coordinar el efectivo funcionamiento del equipo.

2. Formalización del Programa de PPM/Constructabilidad: Como primer paso se recomienda el desarrollo de un manual de PPM, que además sirva como una guía e indicación del compromiso del mandante con la estrategia de PPM, que asegure que los fabricantes y el constructor presten sus servicios dentro de los criterios de PPM. Dentro de este esquema, será necesario desarrollar procedimientos detallados de soporte al PPM. Es decir, se requerirá desarrollar los siguientes esquemas:

- Creación de programa de constructabilidad/PPM.
- Creación de procedimientos de aprobación de ideas de PPM.
- Diseño de reuniones semanales entre diseño, fabricación y construcción.
- Diseño de informes trimestrales (mensuales, o lo que se necesite) acerca de la aplicación de PPM y los beneficios que ésta genera.
- Metodología para identificar, registrar y aplicar las lecciones aprendidas.

3. Diseño de Métodos Constructivos: Este trabajo deberá conducirse durante las etapas de Diseño Conceptual e Ingeniería Básica del proyecto. En principio, se deberá trabajar con los procesos constructivos que tengan un mayor impacto sobre el resultado total del proyecto. Para este fin se analizarán los procesos de modo de enfatizar aquellos que presenten una importancia relativa mayor. Los pasos más importantes a seguir serán:

- Estudio y selección detallada de elementos que serán prefabricados, preensamblados, modularizados.
- Diseño del método constructivo propiamente dicho.
- Diseño detallado de equipos, materiales y herramientas necesarias para la ejecución del método.
- Diseño detallado de la cuadrilla, y funciones específicas de cada componente de la misma.
- Diseño de programa de implementación de los métodos constructivos.

El diseño de los métodos constructivos de manera individual deberá ir acompañado necesariamente de un **análisis del flujo total de la interacción de los métodos individuales** de modo de minimizar interferencias entre ellos.

4. Implementación de Métodos, y Optimización de los Mismos: Esta etapa comenzará tan pronto se inicie la construcción. Los métodos constructivos diseñados en la etapa anterior serán probados en terreno, donde se tomarán las acciones necesarias para que estos sean fluidos, y con el mínimo de recursos. Inmediatamente después, y de modo de optimizar los recursos, se deberán seguir los siguientes pasos:

- Análisis de procesos mediante "análisis de flujos" y «cartas de balance».
- Medición del nivel de actividad en la obra.

5. Recopilación de Sistemas Constructivos: Esta parte del trabajo se realizará, luego del diseño inicial de los métodos constructivos y de la optimización correspondiente, y durante la construcción del proyecto. El resultado de esta etapa del trabajo es compilar los sistemas constructivos que puedan ser usados posteriormente como estándares. Esta información deberá ser recolectada y documentada de modo que pueda ser entendida y usada en futuros proyectos de la empresa.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES FINALES

De acuerdo a la experiencia nacional e internacional en el uso de estrategias masivas de prefabricación, preensamblaje y modularización (PPM), se puede concluir lo siguiente:

1. La utilización de estrategias masivas de PPM ofrece ahorros potenciales de 10-20% en los costos, de 6-30% en los tiempos de construcción, y potenciales de desplazamiento de la mano de obra a sitios con mejores condiciones de 8-56%.
2. Proyectos construidos recientemente en Chile han demostrado la aplicabilidad y los beneficios de la aplicación masiva del PPM.
3. Para aplicar exitosamente políticas de PPM es necesario basarse en el marco de gestión tecnológica que ofrece la "Constructabilidad". Para este fin se deberá favorecer la participación temprana del equipo de construcción en el

proyecto, se deberán establecer adecuadas políticas de contratación y se deberán "diseñar" procesos constructivos en forma detallada.

4. Resulta indispensable que, junto con la participación temprana del constructor, se conforme un equipo "mandante-proveedores-diseñadores-constructores" que lleven adelante la estrategia elegida de PPM (team building).

REFERENCIAS

- Construction Industry Institute (CII) (1993-I), Constructability Implementation Guide, CII Special Publication 34-1
- Construction Industry Institute (CII) (1993-I), Modularization in Industrial Construction, CII Special Publication EM-12
- Construction Industry Institute (CII) (1991), Modularization, CII Special Publication VC-109
- Construction Industry Institute (CII) (1992) MODEX , Modularization Decision Support Software, User's Guide, CII Special Publication 29-2
- Construction Industry Institute (CII) (1991), Modularization/ Preassembly, CII Special Publication VC-412
- Glaser, L. B., and Kramer, J., "Does Modularization Reduce Plant Investment?", Chemical Engineering Progress, Vol. 79, Nº 10, Oct. 1983, pp. 63-68.
- Kliwer, V. D., (1983) "Benefits of Modular Design", Chemical Engineering Progress, Vol. 79, Nº 10, Oct. 1983, pp. 58-62.
- Serpell, A., (1993) Administración de Operaciones de Construcción, Ediciones Universidad Católica de Chile, 1993.
- Tatum, C. B., Vanegas, J. A., and Williams, J. M., (1987) "Constructability Improvement Using Prefabrication, Preassembly, and Modularization", A Report to the Construction Industry Institute.
- Whitaker, R., (1984) "Onshore Modular Construction", Chemical Engineering, Progress Vol. 91, Nº 11, May 28, 1984, pp. 81-88
- Zambon, D. M., and Hull, G. B., (1982) "A Look at Five Modular Projects: The Net Result of Going Modular Has Reduced Overall Project Cost And Improved Schedule for Projects Requiring Large Amounts of Imported Labor", Chemical Engineering Progress, Vol. 78, Nº 11, Nov. 1982, pp. 53-58.

Virgilio A. Ghio Castillo obtuvo el grado de Ingeniero civil en la Pontificia Universidad Católica del Perú, y posteriormente obtuvo los grados de Master of Science y Ph.D. de la Universidad de California en Berkeley, USA. Además trabajó como Ingeniero Investigador en el Instituto Tecnológico de Noruega-NTH, y posteriormente como Ingeniero Consultor en la firma norteamericana de ingeniería de construcción, Ben C. Gerwick, Inc, de San Francisco, California. Actualmente, es profesor auxiliar del Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Además trabaja como consultor de empresas constructoras en sus áreas de investigación, las que se centran en tecnología de materiales de construcción, reingeniería de procesos, innovación tecnológica, e ingeniería de valor.

Luis Fernando Alarcón C. es el Jefe del Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción de la Escuela de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Obtuvo su título de Ingeniero Civil en esta misma Universidad y sus grados de Master of Engineering, Master of Science y doctor of Philosophy en la Universidad de California, Berkeley. Es consultor en administración de la construcción, análisis de riesgo en proyectos y mejoramiento

de la productividad y calidad. Fono: 6864245. E-mail: lalarcon@ing.puc.cl

Mario Campero Q. es profesor del área administración de proyectos de la Escuela de Ingeniería y Gestión de la Construcción de la Universidad Católica. Tiene una larga trayectoria profesional en dirección de importantes obras civiles, particularmente hidroeléctricas. Cuenta con exposiciones en seminarios, congresos, y un vasto número de publicaciones en temas de su especialidad.