

ELEMENTOS PREFABRICADOS DE CONCRETO

**Proyecto Autopista Macro libramiento Mexiquense Tramo 0
Punto de Vigas (Entronque Vehicular)” Río de los Remedios en
Naucalpan Estado de México**

B.J. López, J. Villegas, P. Falcón

Antecedentes

Los elementos prefabricados de concreto han ganado terreno en la construcción, ya que el mercado global de prefabricados a nivel global fue de 144.6 billones de dólares en 2022 y se espera alcance los 198.9 billones de dólares en el 2027, esto implica un crecimiento anual del 6.6%, aproximadamente¹. Son muchos los beneficios que pueden representar desde el punto de vista del constructor con el uso de elementos prefabricados, como son:

- Reducción en costos, tiempos y mano de obra en la ejecución de las obras.
- Mejora en la calidad de la construcción, mediante la estandarización de procesos.
- Mejora de la seguridad en las zonas de trabajo en obra.
- A diferencia de las construcciones realizadas in situ, la construcción prefabricada utiliza menos recursos, como cemento, acero, agua, energía y mano de obra, lo que genera menos residuos en el lugar de construcción.
- Los elementos prefabricados de concreto adoptan un modelo de producción continua en líneas de montaje, con múltiples rotaciones necesarias en un día para garantizar una capacidad suficiente².

El tiempo desde la elaboración de la mezcla de concreto hasta el desmoldeo determina la eficiencia de producción de la planta de prefabricados. Por lo anterior, dependiendo del tipo de elemento y de las características de éste, se estipula el desarrollo de un porcentaje de la resistencia mecánica de diseño a edades tempranas para realizar el desmoldeo del elemento³.

Para mejorar la tasa de rotación del molde y la eficiencia de la producción del concreto, los fabricantes suelen utilizar dos métodos para acelerar la hidratación del cemento: i) el curado térmico y ii) los aditivos químicos⁴.

El curado térmico es una práctica común durante el proceso de producción.

Sin embargo, este método no solo utiliza mucha energía y tiene una alta huella de carbono, sino que también puede provocar una pérdida de resistencia del concreto en etapas posteriores⁵.



Por ejemplo, en algunas encuestas elaboradas en torno al tema de costos en plantas de elaboración de elementos prefabricados en China, se encontró que el consumo energético integral obtenido a través del proceso de curado térmico representa aproximadamente del 88.5 al 93.5% del consumo energético integral de toda la línea de producción del producto unitario⁶.

Además, se descubrió que el curado térmico aumenta la proporción de grandes poros capilares dentro del concreto, lo que conduce a exposición y deterioro del elemento, con la consecuente disminución de la durabilidad del producto unitario a largo plazo⁷.

Por lo tanto, existe un enfoque en la exploración de soluciones técnicas que puedan reemplazar el curado térmico mediante el uso de aditivos químicos adecuados. En la investigación académica dirigida por Xie y colaboradores, se ha descubierto que la sustitución de los métodos de curado térmico con aditivos químicos durante la producción de pilotes de concreto prefabricado conduce a una notable reducción de 72 kg de CO₂ por metro cúbico de concreto producido (72 kg/m³)⁸. Además, se descubrió que, al utilizar la tecnología de aditivos químicos para preparar concreto para elementos prefabricados, las emisiones de CO₂ disminuyeron aproximadamente un 25%, en comparación con la técnica de curado térmico⁹.



Materiales para la elaboración de concretos para elementos prefabricados

Como se mencionó anteriormente, el desarrollo de resistencias iniciales a edades tempranas es fundamental para una planta de elementos prefabricados. Por lo tanto, una selección adecuada de los materiales requeridos se vuelve vital en dos sentidos

El primero de ellos es desde el punto de vista del cumplimiento de las especificaciones técnicas del elemento, como resistencias mecánicas, especificaciones estructurales, durabilidad etc. En el segundo se tiene, y no menos importante, el control de costos.

A continuación, se describen, de manera general, las características de los materiales empleados para la elaboración de este tipo de concretos, los cuales son el cemento, los agregados, y los aditivos.



Cemento

De manera general los cementos deseables, debido a su naturaleza del desarrollo de resistencia a edades tempranas, sería el que se estipula según la norma americana ASTM C-15010 tipo III, o el equivalente en la norma mexicana NMXC-414,¹¹ el cual correspondería a un cemento CPC 40R o CPO 40 R, con contenidos altos de silicato tricálcico (C3S) y aluminato tricálcico (C3A), que se ha identificado que son los componentes responsables del desarrollo de resistencias a edades tempranas.

Sin embargo, desde el enfoque de la durabilidad, no es lo más deseable y menos si los elementos estarán en contacto con sulfatos. Este tipo de cementos no están disponibles en todas las regiones de nuestro país, y debido a las presiones que existen a nivel mundial por disminuir la huella de carbono, los fabricantes se ven en la necesidad de modificar las formulaciones de los cementos para reducir los contenidos de Clinker o la morfología de los cementos para impactar de menor manera el medioambiente¹.

Recordemos que la industria cementera es la responsable de generar entre el 5 al 8 % de las emisiones de CO₂ a nivel global¹². En algunos casos, el uso de materiales cementicios suplementarios como las puzolanas, cenizas volantes, escorias granuladas de alto horno, etc. pueden coadyuvar a lograr estos objetivos.



Figura 2. Cimbrado del elemento, formando el encamisado

Los cementos con alto contenido de caliza y con arcillas calcinadas también están siendo introducidos en el mercado, como una vía para conseguir una disminución en las emisiones de CO₂. Vale la pena destacar que esto no significa una disminución en la calidad de los cementos, pero pueden tener un impacto de retraso en el desarrollo de las resistencias mecánicas a edades tempranas. Lo que es un efecto contrario a lo que se busca en la elaboración de elementos prefabricados.

Agregados

La escasez de agregados de buena calidad en nuestro país y en diferentes partes del mundo se ha vuelto también un desafío. Agregados de origen natural son menos frecuentes, y los agregados triturados se han tornado los más frecuentes; presentando estos algunos inconvenientes como pueden ser las formas/morfologías de las partículas, contenidos de material arcilloso, limos y polvos de trituración que pueden estar incluidos en los agregados. La presencia de estas partículas a su vez incrementa las demandas de los contenidos de agua en los diseños de mezcla para alcanzar la trabajabilidad deseada.

Un método complementario que resulta importante a considerar para la selección adecuada de los agregados es la prueba de azul de metileno ASTM C1777-20¹³.

Además de las pruebas tradicionales necesarias como granulometrías, densidades, absorciones, pérdida por lavado, forma de las partículas, etc. Prueba que se relaciona de forma directa con la actividad de absorción de agua que se puede presentar cuando existe material con contenido arcilloso en los agregados.

Los cuales además de incrementar la demanda de agua, pueden retrasar el desarrollo de resistencias a edades tempranas en el concreto e inclusive en algunos casos inhibir el efecto de dispersión de algunos superplastificantes.

Aditivos

En gran medida, el desarrollo de los concretos modernos está basado en las innovaciones en los aditivos para concreto. Aunque debido a las presiones por disminuir la huella de carbono en la industria cementera, se están haciendo cambios importantes en el proceso y el cemento mismo. Lo que ha propiciado que la tecnología de aditivos continúe jugando un factor fundamental en la tecnología del concreto.

No hay duda de que los superplastificantes se encuentran en el centro de la tecnología de los aditivos químicos¹⁴, en primer lugar, por su capacidad para mejorar la trabajabilidad de los concretos, lo que suele dar lugar a un enorme ahorro de costes y, en segundo lugar, por su gran volumen. Los superplastificantes a base de policarboxilatos (PCEs), son en sí una tecnología desarrollada en Japón en el año de 1981 por parte del Dr. Tsuyoshi Hirata, como respuesta a los problemas de los materiales, por ejemplo, la baja durabilidad y otros factores que enfrentaban los concretos en esas épocas en Japón¹⁵.

Los PCEs han ganado un gran terreno en el campo de los concretos para elementos prefabricados, y continuamente entran en el mercado nuevos productores con productos basados en los conocimientos técnicos existentes o en un nuevo diseño molecular avanzado adaptado a las necesidades locales.

La característica principal de los PCEs es un alto poder de dispersión lo cual se traduce en la elaboración de concretos con muy baja relación agua/material ligante. Esto se ha convertido en una excelente estrategia, en combinación con los materiales adecuados, para hacer que los concretos tengan desarrollo de resistencia a edad temprana.

A pesar de sus grandes beneficios y que a través de ellos se pueden fabricar concretos de Ultra Alto Desempeño u otro tipo de concretos, los aditivos PCEs, tienen algunos puntos que pueden mermar o disminuir su desempeño. Por ejemplo, son extremadamente sensibles a las impurezas de arcilla o limo en los agregados, lo que puede reducir significativamente su eficacia en términos de trabajabilidad del concreto fresco y resistencia a la compresión del concreto endurecido¹⁶.

Diversas investigaciones revelaron que de todas las arcillas y minerales arcillosos individuales, la montmorillonita presente es el material más dañino para los PCEs¹⁷. En general, los superplastificantes pueden interactuar con las arcillas a través de dos mecanismos:

- 1) La adsorción en sus superficies cargadas positivamente y
- 2) A través de la quimisorción (=intercalación) entre las capas principales (=láminas de aluminosilicato) de montmorillonita (ver Figura 1).

Hay que tener en cuenta que la quimisorción es específica de la arcilla montmorillonita y no ocurre con la mayoría de las demás arcillas, la razón es que, tras la hidratación, el espacio entre las capas de aluminosilicato de montmorillonita se abre debido a la entrada de agua (=hinchazón), y luego los PCEs también pueden entrar en este espacio entre capas o láminas¹⁸.

Aunque recientemente existen ya algunas estrategias dentro de las formulaciones de los productos a base de PCEs para superar este problema.

También está bien establecido que los concretos formulados con bajas relaciones agua/material ligante exhiben una consistencia viscosa similar a la miel, lo cual es altamente indeseable. Sin embargo, ya existe la tecnología de productos que son capaces de aumentar la velocidad de flujo o reducir la "pegajosidad", adheribilidad, o viscosidad de dichos concretos.

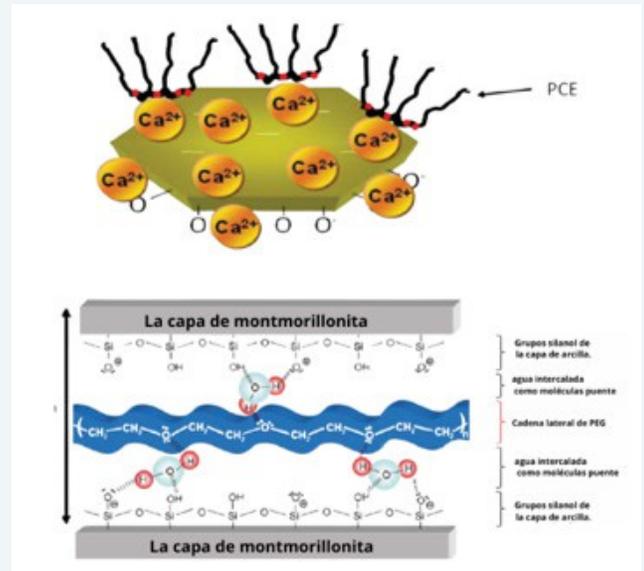


Figura 1. Modos de interacción entre superplastificantes aniónicos y partículas de arcilla: (arriba) adsorción superficial; y (abajo) intercalación química de PCE con cadenas laterales etoxiladas en el espacio entre capas de arcilla montmorillonita, reproducido de la referencia 18¹⁸.

Desarrollo en el "Proyecto Autopista Macro libramiento Mexiquense Tramo 0 Puente de Vigas (Entronque Vehicular)" Río de los Remedios en Naucalpan Estado de México

El proyecto consiste en la fabricación de 1890 traveses AASHTO TIPO V. Los materiales empleados para el proyecto son: Cemento clase RS (resistente a sulfatos), agregados de caliza triturados, y aditivo superplastificante base PCE modificado.

Es importante mencionar que se ha utilizado una tecnología de PCE tolerante a las arcillas desarrollada por nuestro departamento de investigación y desarrollo de Element5 Química Aplicada que es el e5 PCE A Clays SR, además de ayudar el desarrollo de resistencias a edad temprana y presentar una tolerancia a las arcillas, ayuda al desarrollo de resistencias mecánicas a edades tempranas con un tiempo de retención de la consistencia de al menos 2 horas.

Con el uso de los PCEs comunes disponibles en el mercado se presentaban problemas de alta demanda de superplastificante debido a la presencia de material arcilloso y limo en los agregados, provocando retrasos en el desarrollo de resistencias mecánicas iniciales.

Por otra parte, debido a la naturaleza del cemento con características CPC 40 RS por las especificaciones que se mencionan en la Tabla 1, ha sido un reto importante el desarrollo de las resistencias a edades tempranas, ya que no es la naturaleza del cemento RS.

Especificaciones del concreto para los elementos prefabricados

Las especificaciones del concreto más importantes se muestran en la Tabla 1, a continuación. De igual manera se revisaron los criterios que se establecen en la NMX-C-530-ONNCCE-2018.

Especificaciones iniciales del Concreto

Resistencia a la compresión a 28 días [kgf/cm ²] 80% <i>f</i> ' <i>c</i>	450
Resistencia mínima a la compresión a las 12 horas [kgf/cm ²]	360
Permeabilidad rápida a ión cloruro a la edad de 56 días [Culombios]	<2000
Temperatura máxima del concreto durante la producción y colocación [°C]	<32
Revenimiento [cm]	24 ± 3.5
Revenimiento a las 2 horas [cm]	24 ± 3.5
Masa volumétrica en estado fresco comprendido [kg/m ³]	2,300 - 2,450
Relación agua material ligante no mayor	0.45

Tabla 1. Especificaciones del Concreto.



Figura 1. Planta para elaboración de elementos prefabricados HOLPRE. Atitalaquia Estado de Hidalgo, México



Figura 3. Colado de elementos prefabricados HOLPRE. Atitalaquia, Estado de Hidalgo, México.

La Tabla 2 muestra algunos resultados de los concretos elaborados.



Especificaciones del Concreto	Valor
Resistencia mínima a la compresión a las 12 h [kgf/cm ²] 80% f'c	360 409
Permeabilidad rápida a ión cloruro a la edad de 56 días [Culombios]	<2000
Temperatura máxima del concreto durante la producción y colocación [°C]	<32
Revenimiento [cm]	24 ± 3.5
Revenimiento a las 2 h [cm]	24 ± 3.5
Masa volumétrica en estado fresco comprendido [kg/m ³]	2,300 - 2,450
Relación agua material ligante no mayor a	0.45

Tabla 2. Parámetros obtenidos en el concreto producido.

Actualmente la resistencia del 80% de la f'c se ha modificado de 12 A 18 h, cumpliendo los demás parámetros especificados. Se ha llevado a cabo un cuidadoso control de calidad para cada uno de los componentes, como son los agregados pétreos empleados, el cemento y los aditivos.

Figura 2. Descimbrado y movimiento de los elementos prefabricados.

Conclusiones

El diseño de la mezcla de concreto cumple con las especificaciones técnicas establecidas en la Tabla 1, que es lo solicitado tanto por parte del cliente, como lo requerido de acuerdo con el diseño de obra.

Con un trabajo coordinado entre las áreas técnicas desde:

- i) la selección de los materiales adecuados
- ii) el diseño de mezcla
- iii) las pruebas para el cumplimiento de las especificaciones (piloto e industriales)
- iv) el área operativa encargada de la elaboración de la mezcla de concreto cuidando las condiciones de operación
- v) la colocación del concreto adecuado
- vi) la protección y el descimbrado
- vii) el traslado y colocación adecuada de los elementos en sitio, se garantizan proyectos exitosos de una demanda técnica de alta especificación.

Desde el punto de vista técnico uno de los mayores retos ha sido la consecución de las propiedades de la mezcla con diferentes bancos de agregados triturados. También ha sido lograr un desarrollo de resistencias a edades tempranas con un cemento con características RS y con la eliminación total de un curado térmico. Lo anterior también es posible gracias a la tecnología del concreto y al uso de superplastificantes tipo PCE tolerantes a las arcillas.

Por último y no menos importante el diseño de mezcla puede cumplir o ser catalogado como un Concreto de muy baja permeabilidad, por los resultados obtenidos de la prueba ASTM C-1202, lo cual extiende la vida útil del elemento prefabricado, que desde el punto de vista de sustentabilidad, tiene un impacto positivo.

Referencias

1. Precast Concrete Market, Industry Size Forecast Report [Latest]. (s. f.). MarketsandMarkets. https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/prefabricated-construction-market-125074015.html?gad_source=1&gclid=CjwKCAiAty8BhA_EiwAkyoa34Kx0Uvz7xrAW2GoG91aCcg7jOpdQNDh-hHT7fO-mRdmi8T0YxVxShoC8GUQAvD_BwE
2. Feng, X., Zhuo, C., & Yin, S. (2024). The application of C-S-H accelerators in the precast concrete industry: Early-age properties and CO₂ footprint analysis. *Journal of Cleaner Production*, 435, 140558. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140558>. EcuRed. (s. f.). Puente El Zacatal (México) - EcuRed. [https://www.ecured.cu/Puente_El_Zacatal_\(M%C3%A9xico\)](https://www.ecured.cu/Puente_El_Zacatal_(M%C3%A9xico))
3. Alghazali, H. H., Aljazaeri, Z. R., & Myers, J.J. (2020). Effect of accelerated curing regimes on high volume fly ash mixtures in precast manufacturing plants. *Cement And Concrete Research*, 131, 105913. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105913>
4. Narmluk, M., & Nawa, T. (2011). Effect of fly ash on the kinetics of Portland cement hydration at different curing temperatures. *Cement and Concrete Research*, 41(6), 579-589. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.02.005>
5. Türkel, S., & Alabas, V. (2005). The effect of excessive steam curing on Portland composite cement concrete. *Cement and Concrete Research*, 35(2), 405-411. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.01.011>
6. Wang, X., Xie, S., Wei, Z., & Wang, J. (2024). A Study on the Impact of China's Prefabricated Building Policy on the Carbon Reduction Benefits of China's Construction Industry Based on a Difference-in-Differences Method. *Sustainability*, 16(17), 7606. <https://doi.org/10.3390/su16177606>
7. Ba, M., Qian, C., Guo, X., & Han, X. (2010). Effects of steam curing on strength and porous structure of concrete with low water/binder ratio. *Construction and Building Materials*, 25(1), 123-128. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.049>
8. Qi, Z., Liu, F., Deng, M., & Hu, J. (2021). Research on cleaner production potential of pipe pile industry based on material energy flow analysis. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 621(1), 012161. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/621/1/012161>.
9. Kim, T. Y., Tae, S. H., & Yang, K. H. (2014). Life Cycle CO₂ Emission Assessment for Non-Steam Curing Precast Concrete. *Advanced Materials Research*, 1025-1026, 539-542. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1025-1026>.
10. ASTM C150-07 Standard Specification for Portland Cement.
11. NMX-C-414-ONNCCCE-2017 Industria de la Construcción - Cementantes Hidráulicos - Especificaciones y Métodos de Ensayo.
12. Sousa, V., & Bogas, J. A. (2021). Comparison of energy consumption and carbon emissions from clinker and recycled cement production. *Journal of Cleaner Production*, 306, 127277. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127277>
13. ASTM C1777-20 Standard Test Method for Rapid Determination of the Methylene Blue Value for Fine Aggregate or Mineral Filler Using a Colorimeter.
14. Ma, Y., Bai, J., Shi, C., Sha, S., & Zhou, B. (2021). Effect of PCEs with different structures on hydration and properties of cementitious materials with low water-to-binder ratio. *Cement and Concrete Research*, 142, 106343. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106343>
15. Lei, L., Hirata, T., & Plank, J. (2022). 40 years of PCE superplasticizers - History, current state-of-the-art and an outlook. *Cement and Concrete Research*, 157, 106826. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106826>

16. Nehdi, M. (2013). Clay in cement-based materials: Critical overview of state-of-the-art. *Construction and Building* 18. Li, Y., Duan, C., Meng, M., Zhang, J., Huang, H., Wang, H., Yan, M., Tang, X., & Huang, X. (2023). Effect of clay minerals on polycarboxylate superplasticizer and methods to improve the performance of concrete containing clay: a review. *Journal of Materials Science*, 58(39), 15294-15313.

<https://doi.org/10.1007/s10853-023-08989-0> *Materials*, 51, 372-382.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.059>

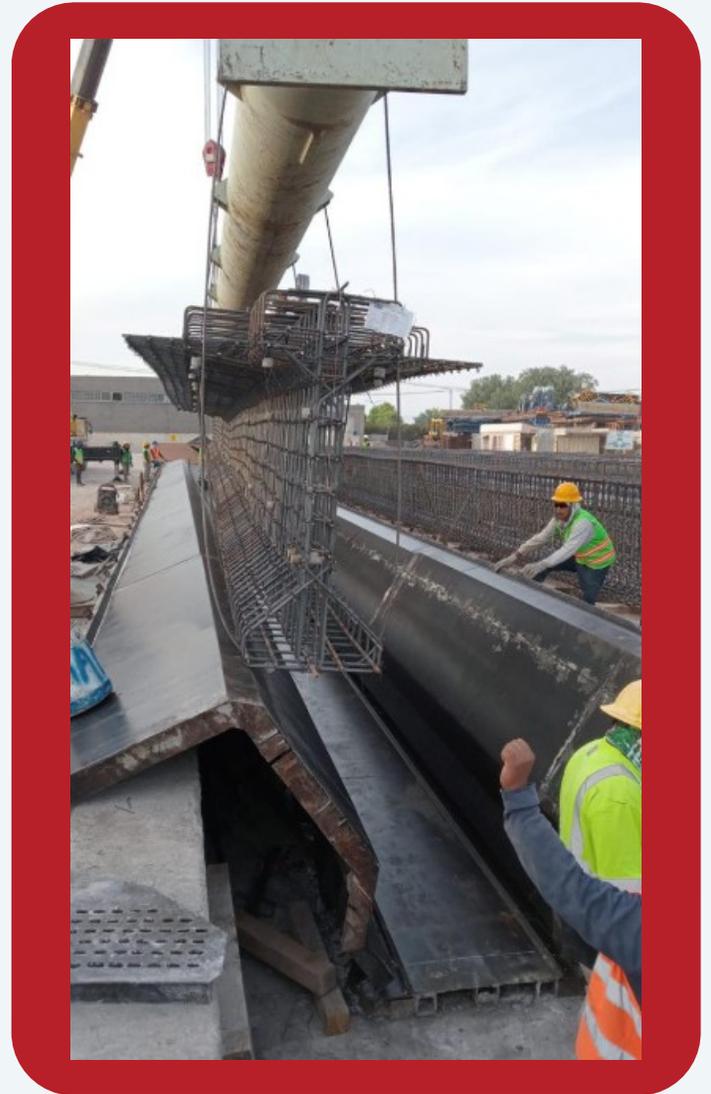
17. Lei, L., Palacios, M., Plank, J., & Jeknavorian, A. A. (2022). Interaction between polycarboxylate superplasticizers and non-calcined clays and calcined clays: A review. *Cement and Concrete Research*, 154, 106717.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106717>
A STM C1202-22e1 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.

18. Li, Y., Duan, C., Meng, M., Zhang, J., Huang, H., Wang, H., Yan, M., Tang, X., & Huang, X. (2023). Effect of clay minerals on polycarboxylate superplasticizer and methods to improve the performance of concrete containing clay: a review. *Journal of Materials Science*, 58(39), 15294-15313. <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08989-0>

19. NMX-C-162-ONNCCE-2014 Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Determinación de la Masa Unitaria, Cálculo del Rendimiento y Contenido de Aire del Concreto Fresco por el Método Gravimétrico.

20. NMX-C-157-ONNCCE-2006 Industria de la Construcción - Concreto - Determinación del Contenido de Aire del Concreto Fresco por el Método de Presión.





Agradecimientos:

- i. HOLPRE Holding Prefabricados S.A. de C.V.
- ii. Element5 Química Aplicada S.A. de C.V.
- iii. ICA Ingenieros Civiles Asociados
- iv. Ing. Ligia Adriana Vázquez Hernández Gerencia de Procuración ICA
- v. Por parte de HOLPRE

Personal Operativo de Planta y Gerencias:

Ing. Jacqueline Eloísa López Avilés Ing.

Víctor Manuel Carranco López

Ing. Marcos Guillermo Rodríguez Cortés Ing.

Miguel Ángel Juárez Gómez (finado) Subdirector
de Prefabricados

Ing. Jorge Moreno Rojo

Ing. Felipe Strassburger Sayago

y todas las áreas involucradas a la producción de prefabricados.



HOLPRE