

# **CONSTRUCCIÓN ACELERADA DE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN: UN CASO DE ÉXITO EN RUTA 5 SUR PARA DISMINUIR CONGESTIÓN**

Javier Arellano Pavez, Dictuc [jgarellano@uc.cl](mailto:jgarellano@uc.cl)

Marcelo González Hormazábal, Pontificia Universidad Católica de Chile, [magonza7@ing.puc.cl](mailto:magonza7@ing.puc.cl)

Álvaro González Vaccarezza, Pontificia Universidad Católica de Chile, [algonzav@ing.puc.cl](mailto:algonzav@ing.puc.cl)

Leonardo Brescia Norambuena, Universidad de Santiago de Chile, [leonardo.brescia@usach.cl](mailto:leonardo.brescia@usach.cl)

## **RESUMEN**

La técnica constructiva “Construcción Acelerada de Pavimentos de Hormigón (CAPH)” es una solución más duradera y sustentable para la construcción, conservación y mantenimiento de pavimentos de hormigón. El artículo presenta un resumen de la metodología adoptada para aplicar la tecnología CAPH, y la experiencia de un prototipo interurbano construido en la Ruta 5 sur, kilómetro 38.500. Los resultados del tramo de prueba indican que la aplicación de la técnica CAPH como método de reparación de pavimentos es favorable, debido al rápido montaje de las losas prefabricadas que permite disminuir el impacto a los usuarios, los tiempos del proceso constructivo y acelerar la apertura al tránsito.

*Palabras clave: construcción acelerada, conservación y mantenimiento, sustentabilidad*

## **ABSTRACT**

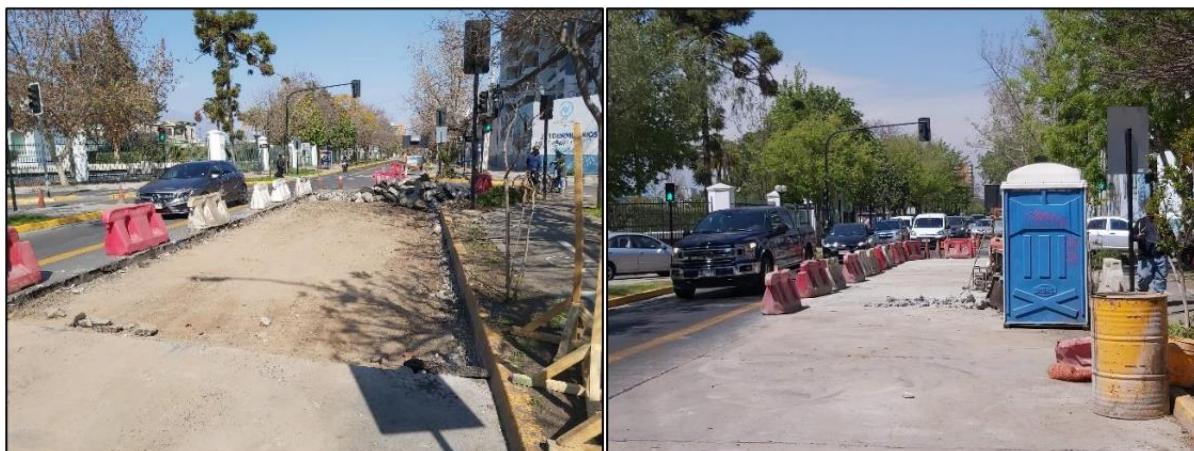
The construction technique "Accelerated Construction of Concrete Pavements (CAPH)" is a more durable and sustainable solution for the construction, conservation, and maintenance of concrete pavements. The article presents a summary of the methodology adopted to apply the CAPH technology, and the experience of an interurban prototype built on Ruta 5 sur, kilometer 38.500. The results of the test section indicate that the application of the CAPH technique as a pavement repair method is favorable, due to the rapid assembly of the precast slabs, which reduces the impact on users, the construction process times and accelerates the opening to the public. transit.

*Keywords: accelerated construction, conservation and maintenance, sustainability*

## 1. INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción actualmente enfrenta grandes desafíos a nivel global en materia de productividad y sustentabilidad. Además, en los últimos años, el aumento del volumen y cargas de tránsito en vías urbanas e interurbanas ha aumentado la tasa de deterioro de los pavimentos, requiriendo trabajos de conservación y mantenimiento de la infraestructura existente.

En la actualidad, estos trabajos son llevados a cabo a través de los métodos tradicionales de construcción de pavimentos, los cuales requieren cerrar las pistas al tránsito, lo que en el caso de pavimentos de hormigón se extiende por 5 días o hasta que el material alcance la resistencia mínima de diseño. Esto genera cortes de rutas, desvíos de tránsito, congestión vehicular y aumentos en los tiempos de viaje, representando un costo social importante para los usuarios de la infraestructura. La Figura 1 muestra el proceso de reparación/reconstrucción parcial del pavimento de la calle Antonio Varas, el cual duró más de un mes.



**Figura 1: Reconstrucción parcial de calle Antonio Varas**

Para abordar esta problemática, la literatura revela que se han desarrollado nuevas técnicas constructivas para reducir los tiempos de construcción, conservación y mantenimiento de pavimentos de hormigón. Una de estas técnicas es la Construcción Acelerada (CA), que se define como un enfoque innovador para acelerar la puesta en marcha de los proyectos (o acelerar la apertura a los usuarios), integrando varias tecnologías especializadas, materiales, alianzas entre colaboradores, nuevos tipos de contratos y métodos de control. Esta técnica tiene varias ventajas en comparación con el método tradicional, como su rápida implementación en terreno que reduce considerablemente el tiempo de cierre de las pistas y, por consecuencia, el impacto sobre los usuarios, sobrecostos, y riesgos, al mismo tiempo que permite mejorar o mantener las condiciones de seguridad y calidad dentro del proyecto (Brescia-Norambuena *et al.*, 2020).

Si bien existen evidencias que confirman las ventajas de la CA por sobre el método tradicional de construcción, en Chile no se conocen estudios que evalúen la aplicación y beneficios de la CA en la conservación y mantenimiento de pavimentos de hormigón. Entre los años 2020 y 2023 académicos de la Pontificia Universidad Católica de Chile y Universidad de Santiago de Chile desarrollaron en Chile la tecnología denominada “Construcción Acelerada de Pavimentos de Hormigón” (CAPH), como parte de un proyecto FONDEF, cuya finalidad es proporcionar soluciones más durables y sustentables para la construcción, conservación y mantenimiento de

pavimentos de hormigón, aplicando procesos constructivos eficientes, productivos, y de menor impacto al usuario.

El proyecto fue amplio y abarcó el desarrollo de una metodología que apunta a optimizar el diseño de mezclas de hormigones en términos de desempeño y reducción de huella de carbono; adaptar los métodos de diseño para que consideren los elementos prefabricados y las nuevas condiciones de transporte, instalación y montaje; incorporar el concepto de diseño digital en toda la vida del proyecto, con el fin de automatizar los procesos constructivos y minimizar errores; y diseñar un proceso de prefabricación, construcción, instalación y montaje apropiado, eficiente y seguro para los pavimentos prefabricados.

Este artículo presenta un resumen de la metodología adoptada para aplicar la tecnología CAPH en la conservación y mantenimiento de pavimentos de hormigón, y la experiencia de un prototipo interurbano construido en la Ruta 5 sur, específicamente en el kilómetro 38.500, el cual resultó exitoso reduciendo los tiempos de intervención y la huella de carbono de la mezcla de hormigón.

## **2. METODOLOGÍA APLICADA**

### **2.1. Diseño de mezclas de hormigón**

Se desarrolló una metodología de diseño de mezclas de hormigones más sustentables y durables, que busca mejorar la eficiencia del uso de cemento y reducir su impacto ambiental. Esta metodología se basa en la optimización de la distribución de tamaño de los agregados gruesos y finos mediante el uso de modelos de *Packing* (o empaquetamiento) y materiales cementicios suplementarios como reemplazo del cemento. El objetivo de este método es lograr que estas mezclas presenten propiedades en estado fresco y endurecido similares o incluso superiores a las mezclas utilizadas actualmente en la construcción de pavimentos de hormigón.

Para esto se utilizó un algoritmo desarrollado por Mena *et al.* (2020) que se basa en el modelo *Compaction-Interaction Packing Model* (CIPM) de Fennis (2011). Este modelo además de los efectos de compactación y mezclado involucra las fuerzas de interacción entre micropartículas ( $<125\ \mu\text{m}$ ) en el empaquetamiento de la fracción de sólidos. Como resultado, el modelo proporciona un diagrama ternario que permite determinar el óptimo de áridos que maximiza el empaquetamiento y, por ende, reduce el contenido de pasta de cemento requerido.

Además, se incorporó el uso de materiales cementicios suplementarios como sustitutos del cemento convencional. Así, a partir de la granulometría obtenida mediante el método de empaquetamiento y utilizando el diseño de pasta equivalente que involucra la incorporación de materiales cementicios suplementarios, se determinó el diseño de la mezcla de hormigón. Para evaluar las propiedades en estado fresco y endurecido del hormigón, se llevaron a cabo diversos ensayos de caracterización. A continuación, se detallan los ensayos realizados:

- Docilidad: ensayo cono de Abrams (NCh1019).
- Tiempo de fraguado inicial y final: se determinó de acuerdo con el procedimiento establecido en la norma NCh152.
- Resistencia a la compresión a 7 y 28 días (NCh1037).

- Resistencia a flexotracción a 28 días (NCh1038).
- Resistencia a la abrasión a 28 días (ASTM C944).
- Durabilidad: ensayo de resistividad superficial a 28 días (AASHTO T358-15).

## 2.2. Diseño estructural

A partir de la ecuación básica de diseño AASHTO 1993 Pavimentos de Hormigón (1) y las recomendaciones del Manual de Carreteras, numeral 3.604 se determinó la geometría y espesor de las losas de hormigón.

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R \times S_0 + 7.35 \times \log_{10}(D + 1) - 0.06 + \frac{\log_{10} \left[ \frac{p_i - p_f}{4.5 - 1.5} \right]}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D + 1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 \times p_f) \times \log_{10} \left[ \frac{R_{mf} \times C_d \times (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 \times J \times \left[ D^{0.75} - \frac{18.42}{\sqrt[4]{\frac{E}{k_c}}} \right]} \right] \quad (1)$$

$W_{18}$  = Ejes equivalentes de diseño

$D$  = espesor losa (in)

$p_i$  = Índice de Serviciabilidad Inicial

$p_f$  = Índice de Serviciabilidad Final

$R_{mf}$  = Resistencia media flexotracción

$J$  = Coeficiente de transferencia de carga

$C_d$  = Coeficiente de drenaje

$E$  = Módulo hormigón (psi)

$k_c$  = Módulo de reacción de combinado

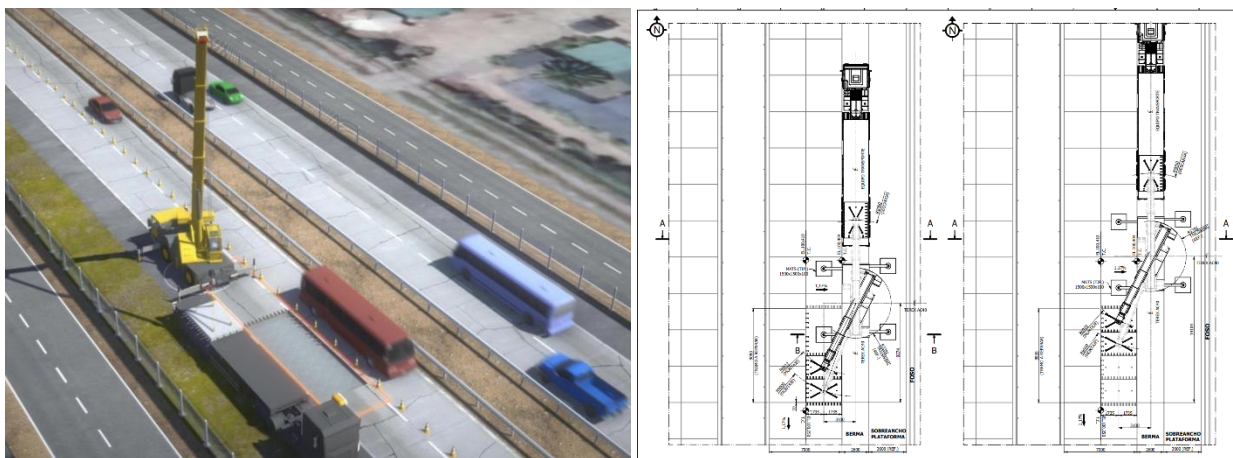
Además, se incorporaron barras de traspaso de carga y armadura de refuerzo, debido a que durante las maniobras de izaje y montaje, se producen momentos flectores y tensiones de tracción que pueden agrietar y producir fallas en la losa prefabricada. Por esta razón, se realizó un análisis numérico con elementos finitos de las tensiones y momentos durante el izaje.

## 2.3. Diseño digital

Se utilizó un software de modelación 3D como herramienta para modelar digitalmente las losas, elementos de aparejo, equipos de montaje y el entorno donde se instalaron las losas prefabricadas. El propósito del diseño digital es evitar errores durante las etapas de prefabricación y montaje de las losas, y optimizar el proceso constructivo.

Como resultado, se elaboraron planos que incluyeron una vista en planta, una vista en elevación y una vista isométrica del montaje de las losas (ver Figura 2-a). Estos planos proporcionan una representación visual precisa del diseño y permitieron mostrar de manera explícita información relevante, como los radios de montaje, distancia con elementos que puedan generar interferencia, distancia a líneas eléctricas (en caso de ser necesario), tablas de carga, listado de elementos de

aparejo, etc. Además, se generó una representación gráfica y animación del proceso constructivo, con el fin de facilitar las coordinaciones, trabajos en obra y comprensión de los pasos a seguir durante la construcción (ver Figura 2-b).



**Figura 2: a) Modelo 3D; b) Plano de montaje.**

## **2.4. Metodología de prefabricación**

Las losas de hormigón se fabricaron en una planta industrializada, siguiendo las indicaciones de los planos generados en el diseño digital. En ella, se fabricaron los moldajes para los elementos de hormigón, se instalaron las barras de traspaso de carga y amarre, entre otros. Luego, se vació el hormigón en los moldajes y se realizó una terminación superficial y macro textura a los elementos prefabricados. Finalmente, se realizó el proceso de curado.

## **2.5. Auscultación visual y estructural**

Se llevó a cabo una auscultación visual y estructural del tramo de prueba a las dos semanas (auscultación inicial) y a los 7 meses (auscultación final) de su apertura al tránsito. La auscultación visual consistió en estudiar el acabado superficial, deterioros superficiales, desviaciones de la forma de las losas, ancho de juntas y escalonamiento. Por otro lado, la auscultación estructural consistió en medir los parámetros de transferencia de carga entre losas y deflexión máxima (como indicador de la capacidad estructural del pavimento), mediante el procedimiento de deflectometría de impacto (FWD).

### **2.5.1. Inspección visual de deterioros superficiales**

Las losas fueron inspeccionadas visualmente para identificar la existencia de deterioros superficiales como grietas, fisuras, defectos de terminación superficial, entre otros deterioros descritos por las normativas aplicadas por la Dirección Nacional de Vialidad (DNV) del Ministerio de Obras Públicas (MOP).

### 2.5.2. Medición de los anchos de junta

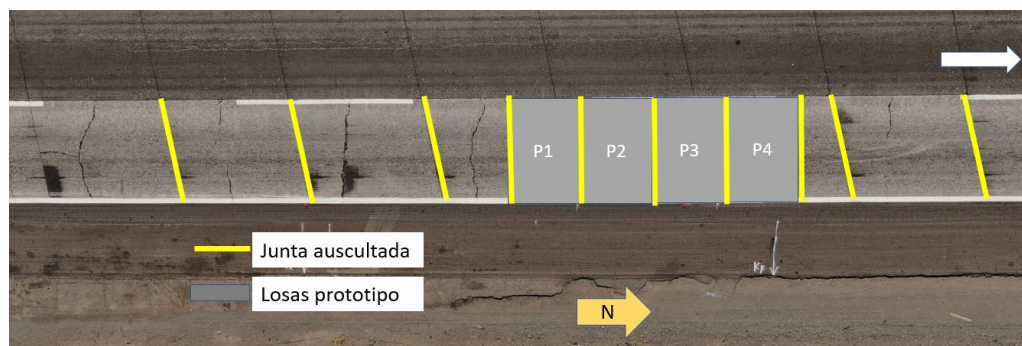
El ancho de junta fue medido con cinta métrica en al menos 3 puntos a lo largo de la junta.

### 2.5.3. Medición del escalonamiento

El escalonamiento es la diferencia de nivel entre una losa y la contigua medida en la junta. Es un deterioro que se produce con el tiempo en los pavimentos tradicionales de hormigón. En este caso al colocar las losas una a una, de no ser correctamente niveladas en el momento del montaje se produce un escalonamiento constructivo. El escalonamiento fue medido con una regla metálica en al menos 3 puntos a lo largo de cada junta.

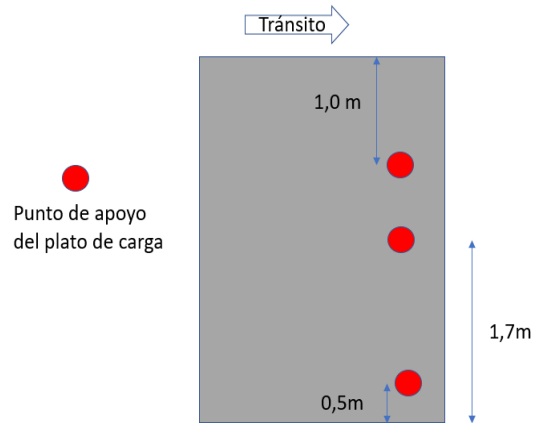
### 2.5.4. Medición de la transferencia de carga

La medición de la transferencia de carga fue realizada por medio del equipo Falling Weight Deflectometer (FWD) o deflectómetro de impacto, de acuerdo con los esquemas de mediciones presentando en la Figura 3 y Figura 4. Las mediciones se realizaron en el sentido de la circulación vehicular, y se midieron: i) juntas entre losas existentes aledañas a las losas del prototipo, ii) las juntas entre las losas del prototipo y iii) dos juntas de control en losas existentes anteriores a la sección del prototipo que se encontraban visualmente sin deterioros superficiales a la fecha de la auscultación inicial.



**Figura 3: Esquema de medición en tramo de prueba (P1, P2, P3 y P4 son las losas prefabricadas).**

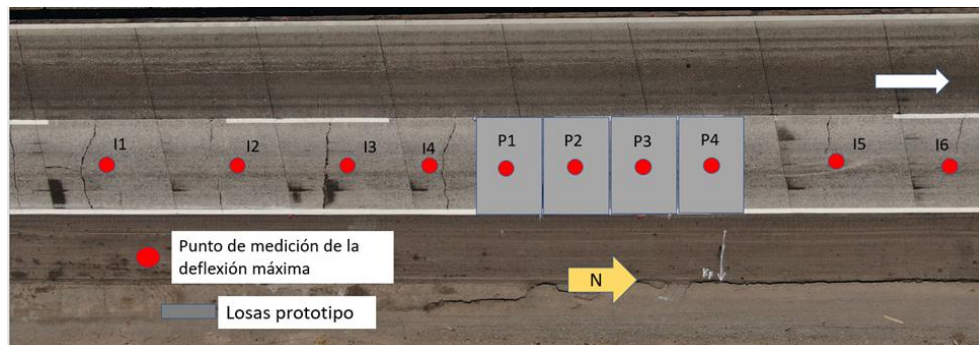




**Figura 4: Esquema de medición en cada junta, en donde el círculo rojo representa la ubicación del plato de carga del FWD.**

### 2.5.5. Medición de capacidad estructural

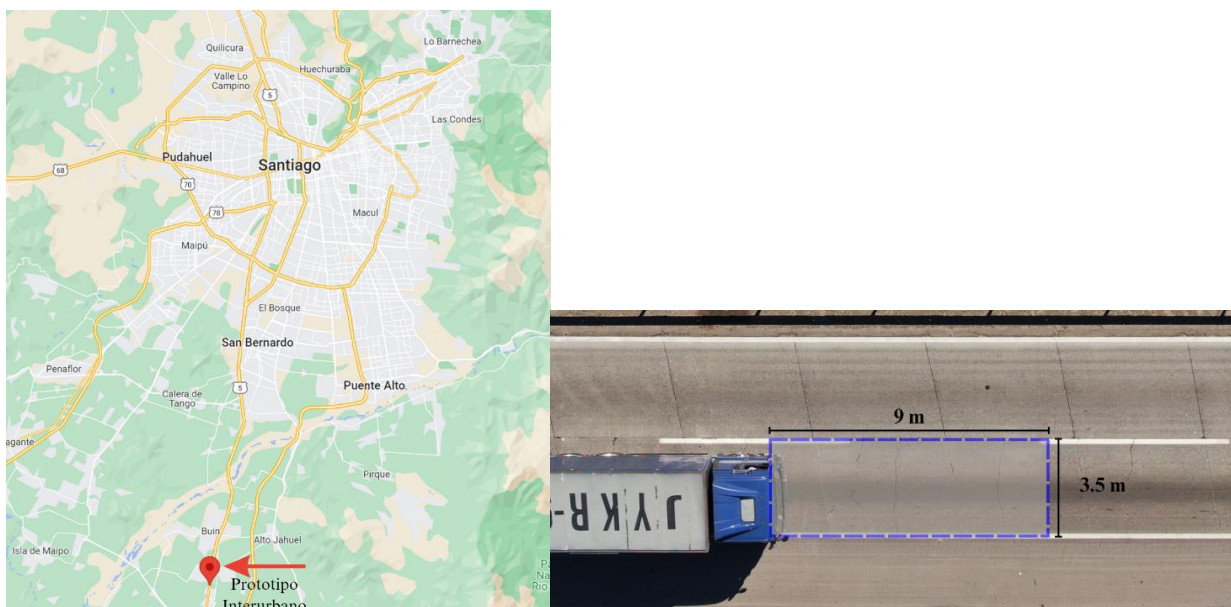
La capacidad estructural de los pavimentos fue evaluada a través de la deflexión máxima normalizada que fue medida al centro de cada losa con el FWD (ver Figura 5). Esta medición representa la deflexión vertical de la superficie del pavimento bajo el punto de aplicación de carga. Éste es un indicador general de la condición estructural de los pavimentos, cuya principal aplicación es definir tramos que presenten diferentes características estructurales.



**Figura 5: Esquema de mediciones de deflexión máxima.**

## 3. CONSTRUCCIÓN DEL TRAMO DE PRUEBA

El prototipo de pavimento interurbano se ejecutó en la madrugada del día 7 de mayo de 2022, en la pista derecha de la calzada en dirección sur - norte de la Ruta 5 sur Km 38.500, en la comuna de Buin, Región Metropolitana (ver Figura 6-a). En la franja horaria en que se realizó el prototipo, el flujo vehicular fue menor a los 1200 veh/hora, con un promedio de 552 veh/hora y un máximo de 1029 veh/hora. El proyecto consistió en reemplazar una sección de 9 m de longitud, 3.5 m de ancho y 24 cm de espesor (ver Figura 6-b) por 4 losas prefabricadas de hormigón de 2.25 m de longitud, 3.5 m de ancho, 24 cm de espesor y, aproximadamente, 5 ton de peso cada una.



**Figura 6: a) Ubicación del prototipo interurbano. b) Fotografía aérea de las losas a reemplazar.**

La construcción del tramo de prueba consistió en las siguientes etapas:

1. Cierre de la pista: Se cerró la pista derecha de la calzada, dejando habilitada solamente la pista izquierda.
2. Demolición y remoción del pavimento existente: Para la demolición de los pavimentos existentes se utilizaron equipos mecánicos como retroexcavadora equipada con brazo extensible y martillo neumático, excavadora de preferencia sobre neumáticos equipada con balde y pica roca, camión tolva, martillo mecánico y cortadora de pavimento.
3. Preparación de la subbase (nivelación y compactación): La compactación de la superficie receptora se llevó a cabo con una placa compactadora.
4. Montaje y nivelación topográfica de las losas prefabricadas: El montaje se realizó con un camión grúa.
5. Inyección de lechada de nivelación.
6. Curado de lechada y sellado de juntas longitudinales y transversales.
7. Apertura de la pista al tránsito vehicular: La apertura del pavimento al tránsito se realizó una vez que el grout y el tratamiento de juntas alcanzaron la resistencia mínima requerida.

#### **4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

Se observó que la aplicación de la tecnología CAPH para la reposición de pavimentos interurbanos es altamente favorable para la administración y usuarios de la infraestructura, y presenta las siguientes ventajas:

- Reducción del tiempo de construcción: la intervención duró 14 horas desde que se cerró la pista hasta abrió al tránsito vehicular (ver Figura 7).
- Habilitación inmediata del pavimento: una vez que el grout alcanzó la resistencia mínima requerida, se habilitó el tránsito vehicular, disminuyendo el tiempo del cierre de la pista en



comparación con la construcción tradicional, que puede extenderse por 5 días o hasta que el material alcance la resistencia mínima de diseño.

- Seguridad ocupacional: se generan zonas de trabajos más seguras al reducir la exposición de los trabajadores.
- Montaje en diversas condiciones: la instalación de los pavimentos se ajusta a las condiciones del proyecto, pudiendo incluso ser instalados durante la noche, permitiendo optimizar el cierre de las pistas.

Estas ventajas se traducen en mejoras en la productividad y en la reducción del impacto social, al minimizar la interrupción del tránsito vehicular, evitar congestiones vehiculares y retrasos prolongados por una puesta en marcha más rápida y por tener menos tiempo una pista inhabilitada.



**Figura 7: Apertura al tránsito del tramo de prueba.**

#### **4.1. Análisis de huella de carbono**

Para evaluar la sustentabilidad de las distintas mezclas se cuantificó la huella de carbono utilizando la ecuación 2.

$$\frac{kgCO_{2eq}}{m^3} = \sum_i^n f e_i \cdot M_i \quad (2)$$

Donde:  $M_i$  es la dosis del material  $i$  en  $ton/m^3$ , y  $f e_i$  corresponde al factor de emisión del material  $i$  en  $kgCO_{2eq}/ton$ .

Los resultados indican que la metodología propuesta, compuesta por una optimización del empaquetamiento de los agregados y por utilizar materiales cementicios suplementarios como reemplazo del cemento, permitió reducir la huella de carbono de las mezclas de hormigón de forma significativa. En este estudio el efecto conjunto de ambas modificaciones permitió producir una mezcla con una huella de carbono 15% menor que la mezcla de control.

## 4.2. Inspección visual de deterioros superficiales

En la auscultación final no se observaron defectos superficiales, mientras que la textura superficial en general no presentó modificaciones. Se observó un leve desgaste en las zonas de las huellas, lo cual está dentro de lo esperado, considerando el alto tránsito de la pista.

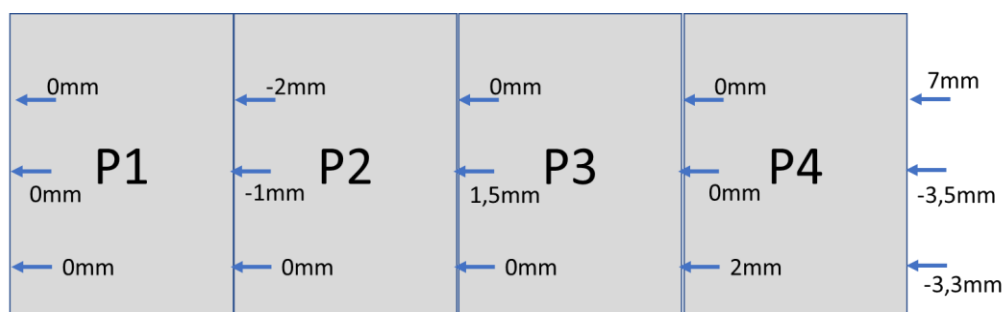
Los puntos de grouteado y de nivelación se observan en buen estado y no presentan desprendimientos. En resumen, después de 7 meses de operación, no se observan deterioros superficiales y las losas del prototipo han demostrado un buen desempeño en términos de su funcionalidad.

## 4.3. Ancho de junta

Debido a los recientes trabajos de mantenimiento realizados en las juntas de la zona del tramo de prueba, las juntas de las losas prefabricadas estaban cubiertas por material de sello al momento de realizar la auscultación final, lo que impidió una medición precisa de los anchos de estas. Sin embargo, se observa que no ha habido un cambio significativo en estos anchos, mostrando un correcto desempeño del prototipo.

## 4.4. Escalonamiento

Durante la primera auscultación, no se registró ningún escalonamiento. En la Figura 8, se presentan los valores de escalonamiento registrados en la auscultación final. Los resultados indican que no hay cambios significativos en el escalonamiento, siendo prácticamente despreciables las variaciones, excepto en la junta entre la losa P4 y el pavimento existente, donde se registró un mayor escalonamiento. En esta junta no se colocaron barras de traspaso de carga, por lo cual era esperable que los valores de escalonamiento fueran mayores en comparación con las otras juntas.



**Figura 8: Resultados de la medición de escalonamiento.**

## 4.5. Transferencia de carga

La transferencia de carga fue medida en cinco tipos de juntas diferentes de acuerdo con el procedimiento descrito en la sección 2.5.4, junta in situ-in situ (JII), junta in situ-prefabricada/con barras (JIPCB), junta prefabricada-prefabricada (JPP), junta prefabricada-insitu/sin barras (JPESB) y juntas de control (JC), en las cantidades indicadas en la Tabla 1.

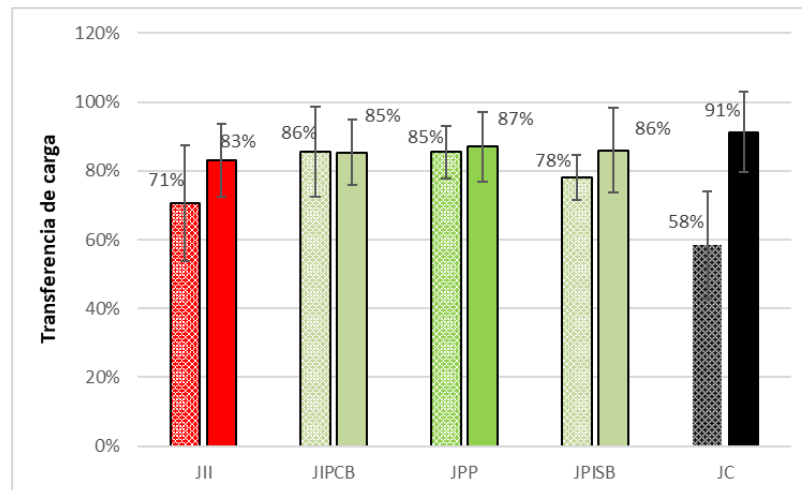
**Tabla 1: Cantidad de mediciones en juntas del prototipo.**

Tipo de junta	Cantidad de juntas auscultadas	Total de mediciones
JPP	3	9
JIPCB	1	3
JPISB	1	3
JII	5	15
JC	2	6

En primer lugar, se realizó un test de hipótesis para verificar si existe una diferencia significativa entre las medias de deflexión máxima para las losas construidas in situ y las losas prefabricadas montadas en la construcción del tramo prototipo. En la Figura 9, se pueden observar gráficamente la diferencia entre los promedios de transferencia de carga de las tipologías de junta analizadas.

Los resultados indican que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la transferencia de carga lograda entre losas prefabricadas del prototipo (87%) y la transferencia de carga entre las losas in situ existentes (83,1%). Esto muestra que las losas del prototipo brindan un desempeño equivalente al de las losas construidas in situ.

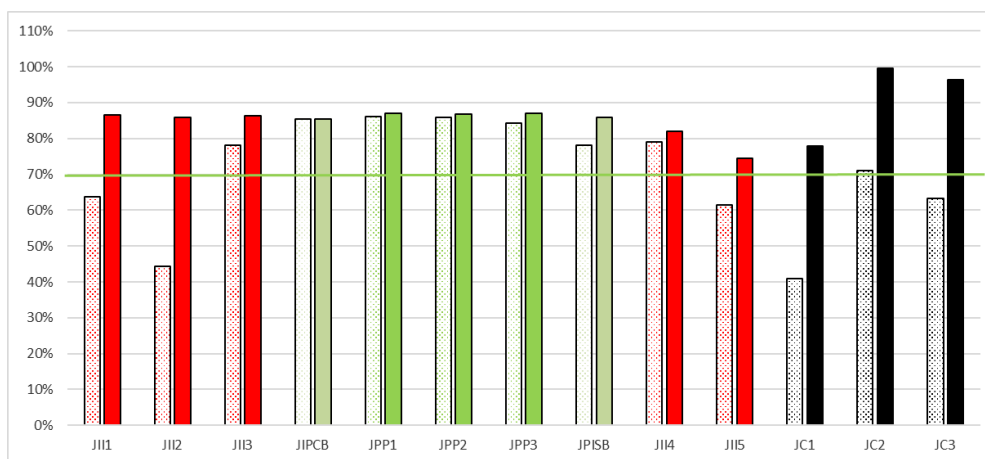
Además, se concluye que estadísticamente no existe una diferencia significativa entre la transmisión de carga entre losa in situ (existente) y losa prefabricada al utilizar o no utilizar barras de transferencia de carga.



**Figura 9: Promedio de transferencia de carga por tipo de junta. Las barras con entramado representan auscultación inicial, las con color sólido representan auscultación final (barra de error es  $\pm$  una desviación estándar).**

Como se observa en la Figura 10, las juntas entre losas in situ (existentes) (rojo) presentan un aumento en su transferencia de carga respecto a la medición inicial alcanzando un promedio de 83% (desviación estándar (DE)=11%), alcanzando en todos los casos el mínimo requerido de 70% según diversos autores (AASHTO, 1993; Tayabji *et al.*, 2012). Por su parte, las juntas que involucran las losas del prototipo (verde) presentan un promedio de transferencia de carga de 86% (DE=10%) presentando prácticamente nula variación respecto a la medición inicial. Además, es

posible observar que la junta JPISB es la que presenta una mayor variación entre la medición inicial y final (78% a 86%), lo cual se puede atribuir a que no presenta barras de transmisión de carga. Por último, las juntas de control (negro) al igual que las existentes aledañas presentan un aumento importante en su transferencia de carga pasando de un promedio de 58% (DE=16%) a 91% (DE=12%).



**Figura 10: Promedio de transferencia de carga por junta (rojo-juntas existentes aledañas, verde- juntas con losas prefabricadas, negro-juntas existentes en losas de control, barras con entramado es medición inicial, color sólido medición final).**

En resumen, las juntas entre las losas del prototipo mantuvieron sin variaciones sustanciales una buena transferencia de carga luego de 7 meses de operación del pavimento, superando el límite recomendado de 70% (Tayabji *et al.*, 2012) para asegurar un buen funcionamiento. El desempeño en la última medición ha sido equivalente entre las juntas con barras de transmisión y la junta sin barras, pero hay que tomar con cuidado este dato pues todas las juntas sin barras medidas (existentes y del prototipo) han mejorado su desempeño para la segunda medición. La explicación para este fenómeno no esperado (pues la transmisión de carga tiende a reducirse con el tiempo y no a aumentar), se puede deber a efectos asociados a la fecha de la auscultación y la condición climática. La auscultación inicial del pavimento se realizó en el mes de mayo, el cual es más frío y húmedo que el mes de diciembre. Esto resulta en que en el mes de diciembre las losas están dilatadas y los suelos que forman parte de la estructura secos (con mejor comportamiento mecánico) lo cual favorece la transferencia de carga.

#### 4.6. Capacidad estructural

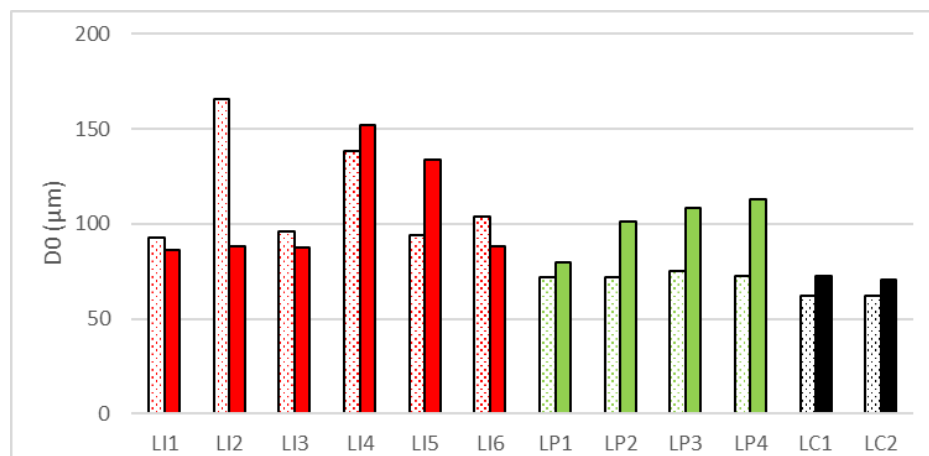
Se estudió la capacidad estructural según lo descrito en la Sección 2.5.5 en las losas in situ existentes (LI) aledañas al prototipo, en las losas del prototipo (LP) y en dos losas de control (LC), según se indica en la Tabla 2.

**Tabla 2: Cantidad de mediciones de Deflexión Máxima registradas por tipo de losa.**

Tipo de losa	Cantidad de losas auscultadas	Total de mediciones
LP	4	4
LI	6	6

LC	2	2
----	---	---

En primer lugar, se realizó un test de hipótesis para verificar si existe una diferencia significativa entre las medias de deflexión máxima para las losas construidas in situ y las losas prefabricadas montadas en la construcción del tramo prototipo. En la Figura 11, se pueden observar gráficamente las deflexiones máximas obtenidas para las losas in situ existentes aledañas (LI en rojo), las losas del prototipo prefabricadas (LP, en verde) y las losas in situ de control (LC, en negro).



**Figura 11:Deflexiones máximas para las losas auscultadas en el prototipo interurbano.**

Los resultados indican que no existe una diferencia significativa entre la media de la deflexión obtenida en las losas in situ existentes y las losas prefabricadas del prototipo, por lo cual se puede afirmar que las losas del prototipo tienen un comportamiento equivalente a las losas construidas in situ.

Además, se observa claramente que las losas prefabricadas del prototipo presentan deflexiones algo menores en promedio ( $100,6\mu\text{m}$ ) que las losas in situ existentes aledañas ( $105,8\mu\text{m}$ ). Lo anterior, confirma que las losas prefabricadas tienen un comportamiento equivalente a las construidas in situ. En el caso de las losas prefabricadas del prototipo, se observa un leve aumento en la deflexión máxima promedio de  $72,7\mu\text{m}$  ( $\text{DE}=1,5\mu\text{m}$ ) a  $100,6\mu\text{m}$  ( $\text{DE}=14,7\mu\text{m}$ ), lo cual es esperable una vez que el pavimento entra en servicio.

En resumen, se puede afirmar que las losas del prototipo han tenido un desempeño estructural, equivalente a las losas in situ existentes, y si bien los niveles de deflexión en estas han aumentado levemente, se mantienen muy por debajo de los límites admisibles, mostrando un buen comportamiento al cabo de 7 meses de servicio.

## 5. CONCLUSIONES

En primer lugar, este artículo presenta la metodología adoptada para aplicar la tecnología CAPH en la conservación y mantenimiento de pavimentos de hormigón. La segunda parte del artículo aborda los resultados obtenidos de la aplicación de la tecnología en un prototipo interurbano

construido en la Ruta 5 sur, específicamente en el kilómetro 38.500. Los principales resultados y conclusiones obtenidos son los siguientes:

- La metodología aplicada para el diseño de mezcla de hormigón, compuesta por una optimización del empaquetamiento de los agregados y por utilizar material cementicio suplementario como reemplazo del cemento, permitió producir una mezcla de hormigón con una huella de carbono 15% menor que la mezcla de control, sin afectar la durabilidad del hormigón.
- La metodología aplicada en el diseño digital disminuye considerablemente los errores durante el proceso constructivo, aumenta la seguridad del proceso y facilita la coordinación entre los diferentes actores involucrados en el proyecto.
- Como consecuencia, de una excelente aplicación de la tecnología CAPH, se logró completar la reposición del pavimento interurbano en 14 horas, abarcando desde el cierre de la pista hasta la apertura de esta al tránsito vehicular. El tramo de prueba consistió en el montaje de 4 losas prefabricadas de hormigón.
- El análisis de la eficiencia de la transferencia de carga entre losas reveló que las juntas que involucraron losas prefabricadas del prototipo lograron un nivel de transferencia de carga equivalente al de las losas in situ existentes, superando ampliamente el mínimo de 70%. No se detectó una diferencia estadísticamente significativa entre la transferencia de carga lograda entre losa prefabricada y losa existente in situ con y sin barra de traspaso. Además, no se registró una variación sustancial en la transferencia de carga medida inicialmente y después de 7 meses de servicio para las juntas de las losas del prototipo.
- El análisis de las deflexiones máximas mostró que la deflexión de las losas prefabricadas del prototipo es equivalente a las losas construidas in situ existentes, lo cual demuestra que se puede obtener un desempeño estructural equivalente mediante la técnica de construcción acelerada de pavimentos de hormigón.
- Se concluye que la aplicación de la técnica de construcción acelerada de pavimentos de hormigón como método de reposición de pavimentos interurbanos es favorable para la administración y usuarios de la infraestructura. El rápido montaje de las losas prefabricadas permitió disminuir el impacto a los usuarios y al flujo vehicular, reducir los tiempos del proceso constructivo y acelerar la apertura al tránsito.
- Si bien los resultados de la aplicación de la técnica CAPH como método para la reparación de pavimentos interurbanos son favorables, es importante seguir estudiando y aplicando esta tecnología en más caminos del país. De esta forma, se podrán tener más datos para evaluar el comportamiento a largo plazo de las losas prefabricadas y un análisis más exhaustivo de los beneficios económicos y sociales de acelerar la puesta en marcha de los pavimentos.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores desean agradecer al Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDEF), por el financiamiento otorgado al proyecto FONDEF IT20I0026, dentro del cual se desarrolló este trabajo.



## REFERENCIAS

ASHTO (1993) **AASHTO Guide for Design of Pavement Structures**. American association of state highway and transportation officials, United States.

Brescia-Norambuena, L., D. Pickel, M. González, S. Tighe y G. Azúa (2020) Accelerated construction as a new approach for underground-mining pavement: Productivity, cost and environmental study through stochastic modeling. **Journal of Cleaner Production** [en línea], 25, 119605.

Fennis, S. (2011) **Design of ecological concrete by particle packing optimization**. PhD Thesis, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology.

González, M., S. Avudaiappan, E.I. Saavedra Flores y Z. Grasley (2021) Improving concrete underground mining pavements performance through the synergic effect of silica fume, nanosilica, and polypropylene fibers. **Construction and Building Materials** [en línea], 285, 122895.

Mena, J., M. González, J.C. Remesar y M. Lopez (2020) Developing a very high-strength low-CO<sub>2</sub> cementitious matrix based on a multi-binder approach for structural lightweight aggregate concrete. **Construction and Building Materials** [en línea], 234, 117830.

Tayabji, S., D. Yen y N. Buch (2012) Precast Concrete Pavement Technology. **Transportation Research Board**.