

REPAVIMENTACIÓN CAMINO LA PÓLVORA, RUTA 60 CH EN CHILE, UTILIZANDO HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRA ESTRUCTURAL Y DISEÑADO CON SISTEMA DE LOSAS DE GEOMETRÍA OPTIMIZADA

Pelayo Del Rio Baeza

Av. Suecia 84, Providencia, Santiago, Chile

56999092653

pelayo@tcp.cl

Juan Pablo Covarrubias Vidal

Av. Suecia 84, Providencia, Santiago, Chile

56994590525

pablo@tcp.cl

RESUMEN

La repavimentación del Camino la Pólvora es un proyecto de gran envergadura debido a la importancia que tiene esta ruta con acceso directo al puerto de Valparaíso y al alto nivel de tránsito al cual este camino es solicitado, pero más allá de la envergadura en temas de tránsito e importancia de la ruta, este proyecto también destaca por la ingeniería que hay detrás y en la implementación de tecnología novedosa que sirve para certificar el avance ingenieril que existe en la pavimentación en Chile. Previo a la ejecución de este proyecto, el Camino la Pólvora estaba conformado de un pavimento asfáltico que demostraba grandes indicios de falla debido a su sollicitación y tiempo en uso, por lo que la mejor solución para la reposición de la ruta fue la de construir un recapado no adherido de hormigón con fibra estructural haciendo uso de la tecnología de losas con geometría optimizada para obtener el espesor óptimo adecuado del pavimento con una vida útil mayor a 20 años. Dentro de las novedades que incluye este proyecto, se puede destacar la realización de estudios previos a la ejecución de la Obra para lograr optimizar tanto costos como calidad de acuerdo a los materiales dispuestos. También se pueden destacar los altos estándares de calidad que se mantuvieron en la Obra en muchos aspectos, lo que fue impulsado por la envergadura del proyecto y la tecnología que se aplicó.

1. INTRODUCCION

Desde el año 2005, se ha incorporado una nueva metodología de diseños de pavimentos de hormigón, optimizando la geometría de la losa, la cual es de un espesor menor a las losas diseñadas con métodos tradicionales (Ej. AASHTO). Esto se logra tomando en consideración la geometría de los ejes de los vehículos (cargas) para que en ningún momento una losa sea cargada por más de un set de ruedas a la vez.

Dentro de diversos proyectos que incluyen esta tecnología en su diseño, se encuentra la repavimentación del camino La Pólvora, con una extensión cercana a los 16 km, este camino pertenece a la Ruta 60 CH y fue pensado para dar un acceso rápido al transporte de cargas hacia y desde el puerto de Valparaíso, V Región, Chile.

Debido al alto nivel de tránsito y carga a los que ha sido sometido este camino, este presentaba un agrietamiento y deformaciones considerables en la superficie, por lo que la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas de Chile (MOP) llamó a licitación para el reforzamiento de este, el cual concluyó en un diseño de una capa de refuerzo de hormigón con fibras estructurales no adherida. La capa fue diseñada con la tecnología llamada Thin Concrete Pavements, obteniéndose un espesor de 23 cm de hormigón con fibra para un tránsito de 189.000.000 Ejes Equivalentes en 20 años de vida útil.

Este documento detalla las ventajas de la metodología constructiva de este proyecto, como también los estudios previos relacionados con la optimización de costos en distintos aspectos que se aplicaron en la adjudicación de este.

2. ANTECEDENTES

2.1. Antecedentes Generales

El camino La Pólvora pertenece a la Ruta 60 CH, y une la Ruta 68 (el sector de Placilla) con el puerto de Valparaíso (Figura 1). El camino tiene una longitud total de 19,1 km, con tramos de simple y de doble calzada. Posee 3 viaductos y 3 túneles principales denominados T1, T2 y T3. En el km 9,4 se encuentra el recinto Zona Externa de Apoyo Logístico (ZEAL), donde los camiones deben ingresar obligatoriamente para realizar los trámites administrativos de revisión, fiscalización, control y coordinación de la carga de importación y exportación. Debido a los esfuerzos de sobrepeso a los que es sometido, el camino presentaba un levantamiento considerable en la superficie, por lo que la Dirección Nacional de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas de Chile (MOP) llamó a licitación para el reforzamiento del camino, el cual finalmente fue adjudicado al consorcio integrado por las empresas Constructora FV Ltda. y Constructora Excon S.A. Para el reforzamiento, se aplicó una nueva técnica constructiva, que consiste en una capa de refuerzo de hormigón con fibras estructurales diseñada con el sistema TCP, que permite disminuir el espesor final de esta.



Figura 1. Ubicación Camino La Pólvara, Ruta 60 CH.1

2.2. Tecnología de Capas de Refuerzo con Hormigón

La tecnología de capas de refuerzo con hormigón es sumamente novedosa y se está aplicando en Chile para la rehabilitación de pavimentos asfálticos, considerando losas de hormigón con fibras estructurales, utilizando como base al pavimento existente. Estas pueden ser adheridas o no adheridas. Ambos tipos pueden colocarse sobre pavimentos asfálticos, compuestos o de hormigón² (Figura 2)



Figura 2. Tipos de capa de refuerzo de hormigón.

¹ Google Maps

² Fick, G. and Harrington, D. (2014). *Guide to Concrete Overlays: Sustainable Solutions for Resurfacing and Rehabilitating Existing Pavements*. 3rd ed. Washington.

Las adheridas son capas muy delgadas, que se incluyen como parte del espesor del pavimento. La adherencia es esencial, de manera que es necesaria una cuidadosa preparación de la superficie antes de colocar la capa. Esta alternativa permite eliminar los deterioros superficiales siempre y cuando el pavimento existente se encuentre en buenas condiciones estructurales. Las opciones de refuerzo no adherido, agregan capacidad estructural al pavimento existente, no siendo necesario que exista adherencia entre las capas. El refuerzo se comporta como un pavimento nuevo en tanto que el pavimento existente proporciona una base estable. Pueden colocarse sobre pavimentos en malas condiciones e incluso deteriorados, siempre y cuando presenten uniformidad. La selección del tipo de capa de refuerzo a utilizar se basa principalmente en la condición previa del pavimento.

2.3. Hormigón Reforzado con Fibras

Se justifica el uso de fibras en el hormigón en situaciones donde, por ejemplo, existen restricciones verticales que limitan el espesor del pavimento, se prevé tránsito con cargas muy pesadas, es deseable aumentar el espaciamiento entre las juntas o no se pueden utilizar barras de traspaso de cargas convencionales. Las fibras puede incrementar la integridad estructural del hormigón, siempre y cuando las fibras sean uniformemente distribuidas y aleatoriamente orientadas. Si son utilizadas adecuadamente, pueden realizar las siguientes funciones dentro de la mezcla de hormigón:

- Ayudar a incrementar la resistencia a flexo tracción del hormigón.
- Ayudar a controlar los movimientos diferenciales de las losas causados por alabeos, cargas pesadas, temperaturas, etc.
- Aumentar la resistencia del hormigón al agrietamiento por retracción plástica.
- Mantener las grietas firmemente juntas.

2.4. Tecnología de Diseño TCP

La tecnología de diseño TCP (Thin Concrete Pavements), consiste en el diseño de pavimentos con losas de geometría optimizada, distintas a las losas tradicionales (AASHTO), capaces de distribuir mejor la carga y evitar el agrietamiento. Normalmente, las losas de hormigón convencional (AASHTO) son de 3,5 metros de ancho por 4 metros de largo, lo que permite que gran parte de la carga de un vehículo se concentre en ella, generando así grandes tensiones. El diseño TCP propone principalmente dimensionar las losas de manera tal que éstas permitan que se apoyen sólo un set de ruedas a la vez, disminuyendo las tensiones de tracción ejercidas por la carga sobre la superficie, y así requerir un menor espesor de diseño.

2.5. Antecedentes del Proyecto

2.5.1. Situación Previa

Según los antecedentes del Ministerio de Obras Públicas, el camino presentaba un levantamiento considerable de la condición superficial del pavimento, el cual mostraba el efecto de esfuerzo por medio de agrietamiento (Figura 3). La condición previa del pavimento asfáltico se atribuye en primera instancia, a esfuerzo por sobrepeso. No existían sistemáticamente deterioros o fallas que puedan ser atribuidas a descensos por asentamientos, movimientos de suelos, u otros relacionados con el apoyo de la calzada.



Figura 3. Situación previa del camino

Más allá del deterioro observable a simple vista del pavimento asfáltico del camino La Pólvora, los estudios previos para presentar la solicitud de reposición de este indican que la Ruta se encontraba con un IRI promedio igual a 8 m/km.

Dada la situación en la que se encontraba el camino La Pólvora, se concluyó que el pavimento asfáltico existente estaba en malas condiciones³. Además, es importante considerar que en Chile, se presenta frecuentemente alabeo en las losas, lo que dificulta una perfecta adherencia entre las capas. Por estas razones, la solución recomendada para el proyecto, es una capa de refuerzo con hormigón no adherido al pavimento asfáltico.

2.5.2. Diseño

Como se establece en la Guía para Capas de Refuerzo con Hormigón, el diseño de losas cortas de hormigón no adherido fue realizado con el software OptiPave2⁴ (TCPavements 2010). Este software utiliza la tecnología de diseño TCP para calcular el espesor del pavimento de hormigón en base a cualquier combinación de climas, tránsitos, capas de subrasantes/subbases y materiales, incluyendo la adición de macro fibras.

³ Según los criterios establecidos en la publicación de Fick, G. and Harrington, D. (2014). *Guide to Concrete Overlays: Sustainable Solutions for Resurfacing and Rehabilitating Existing Pavements*.

⁴ Software de diseño de pavimentos con losas de geometría optimizada, desarrollado por TCPavements.

El diseño se realizó para una vida útil de 20 años, considerando el tránsito de 189.000.000 de Ejes Equivalentes y una estructura bajo el pavimento de pavimento asfáltico existente fresado hasta un mínimo de 6 cm sobre una subrasante de módulo resiliente igual a 80 MPa. El resultado del diseño concluyó en losas de 175 cm de largo y 175 cm de ancho con sobrecanto de 20 cm y espesor de 22 cm de hormigón de resistencia característica a la flexo-tracción de 5,0 MPa a 90 días con 80% de nivel de confianza, tamaño máximo de áridos igual a 40 mm y resistencia residual de 1,0 MPa según ASTM 1609.

2.5.3. Situación con proyecto

Para el Camino La Pólvara, se ha considerado un pavimento de hormigón de losas de espesor optimizado, de 23 cm de espesor sobre el pavimento asfáltico existente. Es necesario fresar previamente el pavimento asfáltico existente en un espesor de 6 cm. Las especificaciones técnicas del proyecto establecidas por el Ministerio de Obras Públicas se resumen a continuación.

Especificaciones técnicas⁵

- El árido grueso deberá tener un tamaño máximo absoluto de 40 mm y cumplir con los siguientes requisitos:

Tabla 1. Requisitos para los áridos del proyecto

Requisito	Exigencia	Método
Porcentaje de chancado	Entre 60% y 90%	8.202.6 del MC-V8
Porcentaje de lascas	Máximo 2%	8.202.6 del MC-V8

- La fibra estructural debe ser sintética y cumplir con lo especificado en la norma ASTM C1116.
- El hormigón deberá ser confeccionado con cemento hidráulico de alta resistencia y con una dosis de cemento mínimo de 300 kg/m³ y máximo de 380 kg/m³.
- El hormigón deberá ser dosificado por métodos tradicionales y optimizar su granulometría mediante el método de Shilstone. El resultado deberá estar dentro de la zona achurada descrita como “Zona para pavimentos” mostrada en la Figura 4.

⁵ Dirección Nacional de Vialidad, MOP. (2014). “Antecedentes de licitación pública: Reposición pavimento ruta 60-CH camino La Pólvara, cruce ruta 68-acceso sur a Valparaíso”.

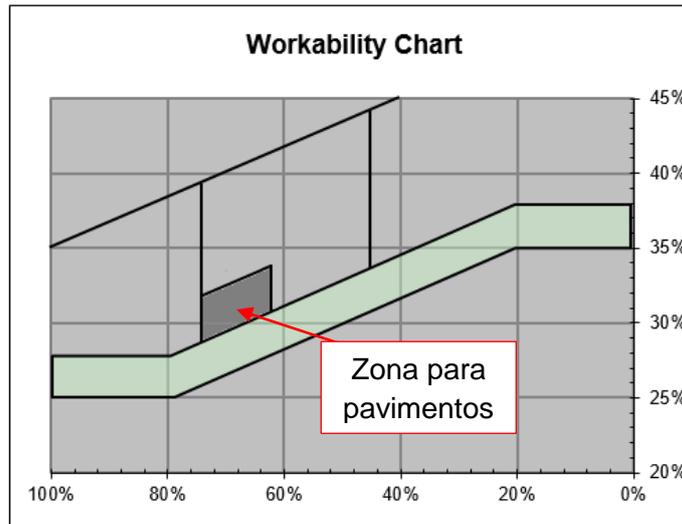


Figura 4. Zona recomendada para pavimentos.

- El pavimento de hormigón debe ser HF 5 (80) 40. Es decir, que sea un hormigón que resista a las cargas de flexo tracción 5 MPa a los 90 días, con 80% de confiabilidad y un tamaño máximo del árido de 40 milímetros. Además, debe cumplir con una resistencia residual de 1,0 MPa según la ASTM 1609.
- Las losas deben ser de 175 cm de largo por 175 cm de ancho. La losa exterior⁶, en ambos sentidos, debe considerar un sobrancho de 20 cm. Con esto, la dimensión final de esta losa es de 175 cm x 195 cm, en la cual se debe marcar la línea de borde 20 cm hacia adentro del borde de la losa (Figura 5).

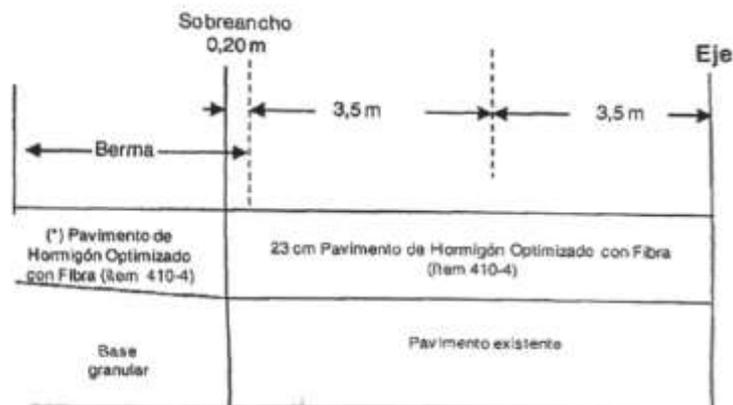


Figura 5. Eje camino La Pólvara Troncal.

⁶ Se entiende por losa exterior, a la losa que queda adyacente a la berma

3. ESTUDIO PREVIOS

3.1. Estudio de Hormigón

Para la determinación de la mezcla de hormigón para la capa de refuerzo, se llevó a cabo un estudio de manera de obtener una mezcla óptima para el proyecto. Se confeccionaron 30 hormigones de prueba combinando los diferentes tipos de áridos, cementos, aditivos y fibras existentes en el mercado del país. Cada una de las mezclas, se ensayó tanto en su estado fresco como endurecido. En su estado fresco se midió el asentamiento de cono de Abrams y en su estado endurecido, se ensayaron a 3, 7 y 28 días a la compresión cúbica, a la tracción por flexión y también se midió su resistencia residual. Con los resultados obtenidos, se propuso la combinación óptima para el proyecto, de manera de cumplir con las especificaciones técnicas y económicas establecidas.

Los hormigones de prueba se realizaron según los procedimientos establecidos en el Manual de Carreteras 8.402.15 y se dosificaron para una resistencia a flexión de 4,5 MPa a 28 días, un nivel de confianza de 80%, condiciones de trabajo buenas, asentamiento de cono de 6 cm y un tamaño máximo de árido de 40 mm. Los áridos se optimizaron con el método de Shilstone.

El estudio se realizó en 4 etapas. En la primera etapa, se estudió el comportamiento de los áridos, realizándose 6 mezclas de hormigón, variándose los 4 tipos de áridos disponibles de la V Región de Valparaíso (dos de ellos fueron utilizados más de una vez). La segunda etapa, se confeccionaron 10 mezclas, en donde se utilizaron 5 tipos de cementos de Alta Resistencia. La mitad de las mezclas se dosificó con una dosis de 300 kg/m³ y la otra mitad con 340 kg/m³ de cemento. Con esta etapa se logró determinar con que dosis se cumple la resistencia a flexo tracción requerida para cada tipo de cemento. En la tercera etapa, se hicieron nuevamente 10 mezclas para 5 tipos de fibras sintéticas. Se dosificaron con dosis de 2,5 kg/m³ y 3 kg/m³ de fibra para definir la dosis con la que se logra una resistencia residual de 1 MPa. La última etapa, consistió en la confección de 4 mezclas, en donde se estudió el comportamiento de la mezcla frente a aditivos para el control de reología y aditivos que incorporan aire.

Para la selección de los áridos, se tomaron en cuenta la capacidad de producción en planta que tenía cada uno, su procesamiento y el comportamiento en la mezcla tales como la cantidad de agua requerida para lograr un asentamiento de cono de 6 cm. La Figura 6 corresponde a un gráfico utilizado para contrastar la dosis de agua necesaria por tipo de árido para lograr el asentamiento de cono especificado del hormigón fabricado, mientras que la Figura 7 corresponde a un gráfico utilizado para contrastar la dosis de cemento necesaria por tipo de árido para lograr la resistencia a la flexotracción especificada.

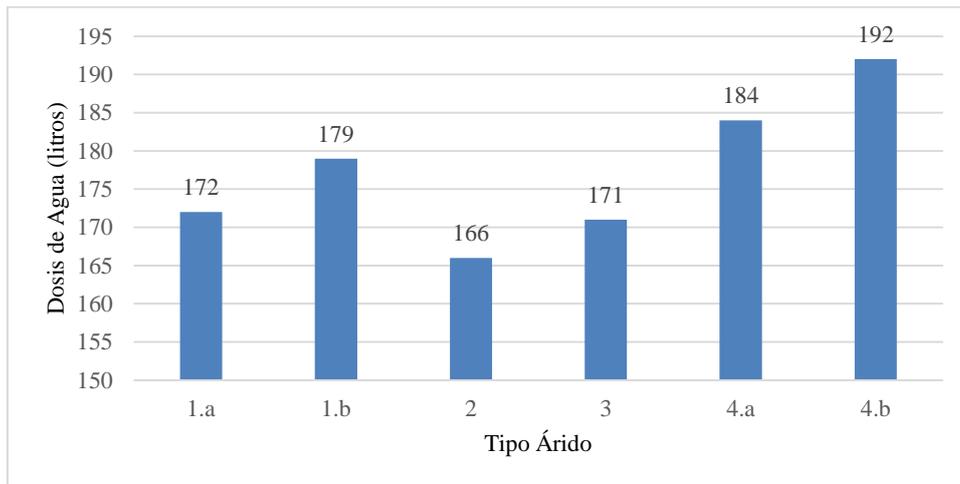


Figura 6. Dosis de Agua en relación al tipo de Árido

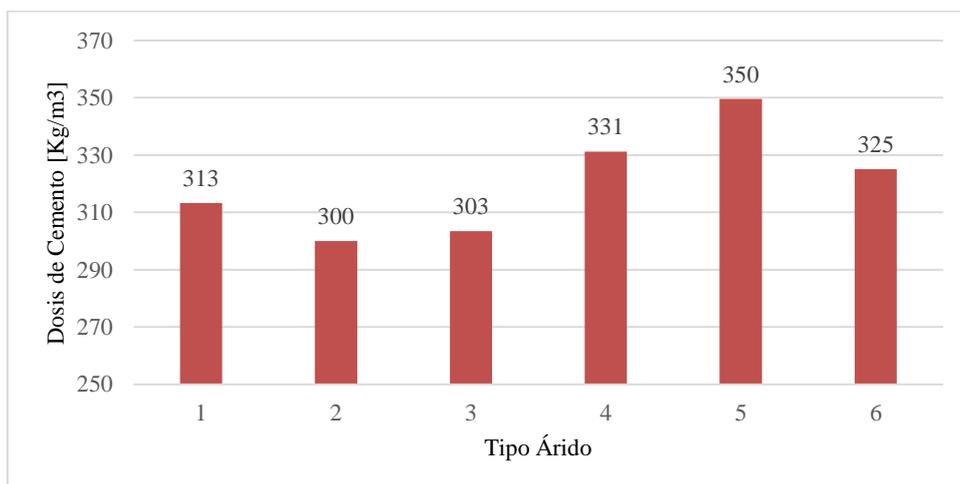


Figura 7. Dosis de Cemento en relación al tipo de Árido

Si bien el árido del tipo 1 no requiere la menor dosis de agua por metro cúbico de hormigón, este árido es un poco más barato que el de tipo 2 (0,18% más barato con limitación) y comparativamente más barato que el de tipo 3 (5,40% más barato con limitación). Estas diferencias llevan a que el hormigón producido con áridos del tipo 1 sea el más barato, por lo que se propuso el uso de este árido, que es un árido de la empresa Melón que, por lo demás, ofrecía una alta capacidad de producción.

Según los ensayos que continuaron con este estudio, todos los tipos de fibra sintética logran una resistencia residual de 1 MPa con dosis de 2,5 kg/m³ o 3 kg/m³ como se puede ver en la Figura 8.

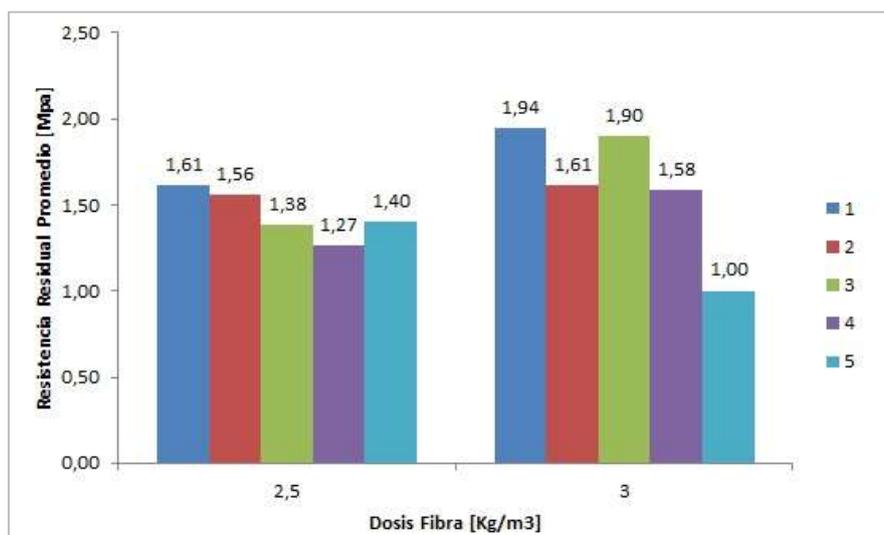


Figura 8. Resistencia residual promedio para tipo y dosis de fibra.

A su vez se midió el asentamiento de cono de Abrams para cada tipo de fibra y dosis estudiadas, en donde se pudieron ver diferencias según estas variables. Las diferencias existentes en el descenso de cono, implican que cada tipo de fibra absorbe una cantidad distinta de agua. Es importante considerar esa cantidad requerida y ajustar el agua dosificada según el tipo de fibra utilizada. En la Figura 9, se muestra el total de agua requerida por cada tipo de fibra para dosis de 2,5 kg/m³ y 3 kg/m³.

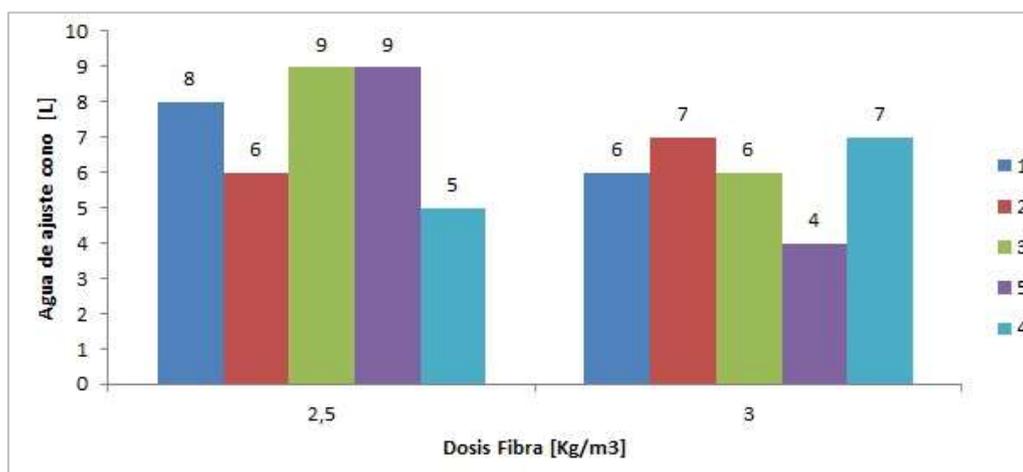


Figura 9. Agua de ajuste de cono para tipo y dosis de fibra

Cualquier tipo de fibra podría utilizarse para el proyecto, pero se eligió la fibra específica debido a su trayectoria en la elaboración de hormigones con fibra para losas cortas de hormigón.

Para poder escoger el tipo de cemento utilizado en este proyecto, se midió la dosis real de agua necesaria por tipo de cemento y dosis de 300 kg/m³ y 340 kg/m³. La Figura 10 es un gráfico que compara la dosis real de agua para distintos tipos de cemento y las dosis mencionadas.

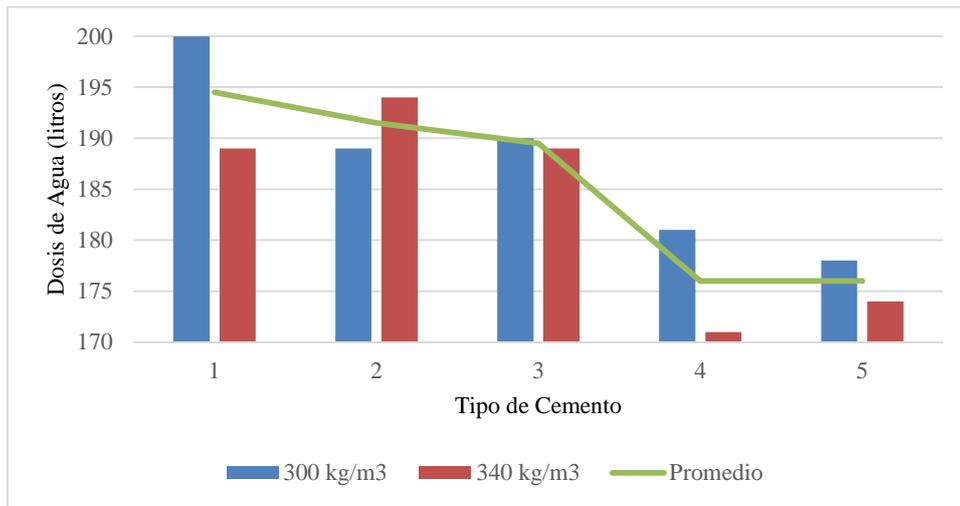


Figura 10. Dosis real de agua para tipo y dosis de cemento.

Cabe mencionar que estos ensayos no tienen valor estadístico, por lo que, para este caso, la dispersión logra que no se muestre una diferencia coherente entre la dosis de agua para dos dosis distintas de cemento en un mismo tipo, pero si se puede ver con la línea de promedio qué cementos requieren más o menos cantidad de agua.

Para los 5 tipos de cementos, con una dosis de 340 kg/m³, se logró una resistencia de 4,5 MPa a los 28 días. La decisión se dejó a criterio de la empresa constructora. Para el tipo de cemento escogido, el aditivo recomendado es un aditivo reductor de agua y retardador.

Las últimas pruebas se realizaron observando el comportamiento de aditivos adicionales frente a la resistencia a la flexotracción. Las mayores diferencias en resistencia se midieron entre un hormigón sin aditivo adicional, otro con aditivo tipo 5 y uno con aire incorporado. La Figura 11 es un gráfico que muestra las diferencias de resistencia entre el aditivo utilizado, más la adición de aditivo tipo 5 o aire incorporado.

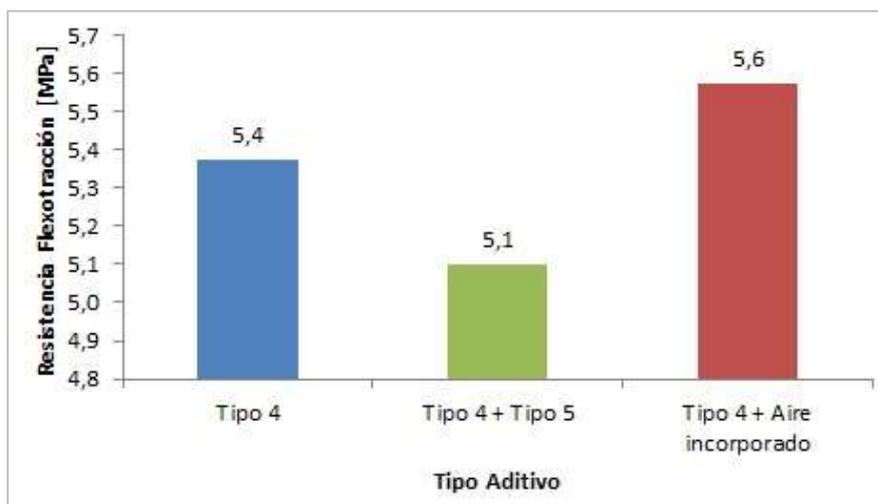


Figura 11. Resistencia a la flexotracción según tipo de aditivo.

Para el proyecto, se busca utilizar dosis pequeñas de aditivo, de manera que actúe como un jabón, que transforme el aire que está presente de forma natural en el hormigón en burbujas chicas, actuando como arenas finas que logran dar más cohesividad a la mezcla. Cuando se incorpora más del 4%, tiende a bajar la resistencia a la flexo tracción, pero ésta puede subir cuando se utilizan dosis más bajas como en este caso (3%).

La dosificación propuesta para la mezcla de hormigón se muestra en la Tabla 2:

Tabla 2. Dosificación propuesta para la mezcla de hormigón

Hormigón HF 5,0 (80) 40 6		
Material	Tipo o Procedencia	Dosificación
Cemento (kg/m ³)	Cemento formulado a base de clinker, puzolana y yeso	340
Agua Libre(kg/m ³)	-	168
Grava ⁷ (kg/m ³)	Río Aconcagua, Chile	698
Gravilla(kg/m ³)	Río Aconcagua, Chile	132
Arena (kg/m ³)	Río Aconcagua, Chile	1057
Aditivo(kg/m ³)	Aditivo reductor de agua - Retardador	2,04
Fibra Sintética (kg/m ³)	Fibra a base de Olefina Modificada, de 550 – 640 MPa de Resistencia a la Tracción	2,5
Relación Agua/Cemento	-	0,49

Un análisis posterior al estudio de hormigón⁸, confirma que la mezcla propuesta para el proyecto efectivamente resulta ser la mezcla más económica. Para las mismas especificaciones, utilizando otro tipo de árido se obtienen alzas de costo total de la mezcla hasta en un 6%. Para las fibras, el costo no aumenta más que en un 1,5% y para los cementos pueden aumentar hasta en un 7,5%. También, se demuestra que una mezcla formada por los componentes con costo unitario menor, no necesariamente implica un costo total de la mezcla más económico, es más, puede aumentar los costos totales de la mezcla hasta en un 6%.

4. CONSTRUCCIÓN

La construcción de la capa de refuerzo fue adjudicada al consorcio integrado por las empresas Constructora FV Ltda. y Constructora Excon S.A. Se estimó un plazo de 9 meses para la pavimentación, considerando un avance diario de 500 m lineales. Los métodos constructivos se determinaron de manera que el tránsito de la vía se mantuviera habilitado

⁷ La dosificación de los áridos está calculada para condición saturada superficialmente seca (SSS).

⁸ María Pilar Lyon Vial (2016). Análisis del proyecto de reposición del camino La Pólvora con capas de refuerzo de hormigón (memoria de título). Universidad de los Andes, Santiago, Chile.

durante la ejecución de la obra, ya que es una ruta de gran importancia para el traslado de carga desde y hacia el puerto, por donde circulan alrededor de 130 mil vehículos mensuales. El procedimiento a seguir consistió en la pavimentación por pista, manteniéndose siempre habilitadas dos pistas para el tránsito de vehículos y haciendo uso de las pistas repavimentadas cuando fuese necesario. Al comienzo de la obra, los primeros 100 metros lineales de pavimentación, se utilizaron como tramo de calibración para probar el funcionamiento de los equipos, proceso de colocación y compactación, metodología de trabajo, aserrado de losas, métodos de curado, entre otros. La instalación de faena consta con un laboratorio en donde se realizan ensayos para el control de calidad, una planta de hormigón instalada y oficinas de trabajo.

Debido al alto tránsito de la ruta del proyecto, todos los métodos constructivos que interfirieran en alguna medida al tránsito durante la repavimentación de esta, fueron pensados para mantener un orden y flujo constante vehicular. La repavimentación fue pensada para dejar siempre al menos una pista habilitada por sentido, utilizando bermas, el pavimento asfáltico anterior, como también los tramos repavimentados que ya se pudieran habilitar para tránsito de vehículos pesados.

5. PREPARACIÓN DE SUPERFICIE

Para preparar la superficie antes de realizar el recapado en hormigón, se realizó un fresado del asfalto existente en algunos tramos del camino. Este, se realizó con una máquina autopropulsada específicamente diseñada para remover pavimento asfáltico. Consistió en la remoción de 1 cm de profundidad como mínimo para dejar el pavimento asfáltico con un mínimo espesor de 6 cm. La remoción de pavimentos asfálticos se estableció en un total de 1.100 m² de superficie.

6. ELABORACION DEL HORMIGON

Todo el hormigón del proyecto se elaboró en una planta estacionaria de hormigón con capacidad de fabricación de hormigón máxima igual a 80 m³/hr. Esta planta de Hormigón cuenta con contenedores para separar hasta 6 tipos de áridos distintos en un volumen de hasta 260 m³, contenedor de fibras estructurales con dosificador y un contenedor de agua con sistema de pesaje de hasta 300 lts., en donde también se agregan aditivos. Del lado opuesto a estos contenedores, se encuentran tres silos de cemento. Todos los materiales son pesados en tiempo real para respetar la dosificación de la mezcla bajo la supervisión de un operador en la planta. La Figura 12 corresponde a la planta utilizada en este proyecto.



Figura 12. Planta de hormigón utilizada

El orden de la mezcla de los materiales es fundamental para mantener una distribución uniforme del hormigón, y evitar que se generen puntos de acumulación de fibras sintéticas. Una característica de este proyecto, es que la mezcla se inicia añadiendo la fibra estructural junto a los áridos gruesos con el fin de que el impacto de los áridos gruesos lograra desarmar los paquetes en los cuales vienen contenidas las fibras. Luego de agregar el resto de los áridos a la mezcla anterior, esta es transportada por un contenedor hasta la parte central de la planta, en donde se realiza la mezcla de materiales secos con el aditamento de cemento por tubos transportadores. Finalmente, se añade la mezcla de agua y aditivo a la mezcla seca.

7. TRANSPORTE Y COLOCACIÓN

El transporte de hormigón, tal como se puede ver en la Figura 12, se realiza en camiones tolva desde la planta de hormigón hasta el frente de pavimentación. Debido a la ubicación de la planta (ver Figura 1) con respecto al largo del proyecto, la cantidad de camiones tolva para el transporte del hormigón fue variando en función de la ubicación del frente de pavimentación. Los camiones tolva utilizados se cargaban con hasta 8 m³ de hormigón por camión, lo que no corresponde al total de su capacidad, ya que el peso de la mezcla puede desestabilizar al camión en el proceso de descarga de este. Debido al tiempo y condiciones de transporte, el hormigón sufría pérdidas en su docilidad por viaje en un orden de 2 cm menos de descenso de cono de Abrams en promedio, pero esta pérdida fue previamente estudiada para que el hormigón puesto en el frente de pavimentación cumpliera con las características necesarias para poder pavimentar. El tiempo de viaje del hormigón desde la planta hasta el frente de pavimentación tuvo que ser constantemente coordinado con la velocidad de avance del tren pavimentador del frente de construcción para evitar que este se quedara sin hormigón para pavimentar.

El hormigón descargado frente al tren pavimentador, fue distribuido por un operador en una máquina excavadora de tamaño mediano para así entregar con mayor uniformidad el hormigón al tren pavimentador como se ve en la Figura 13.



Figura 13. Distribución de hormigón frente a tren pavimentador.

Para este proyecto, se utilizaron dos máquinas pavimentadoras con capacidad de hasta 5 metros de ancho para pavimentar. Este tipo de tren pavimentador, puede variar su velocidad de avance lineal desde 0 a 5 m/min, pero para este proyecto, la velocidad promedio de avance fue de 1 m/min. Pese a que se contó con dos trenes pavimentadores, la obra se realizó siempre pavimentando en un solo frente. El segundo tren pavimentador se utilizó para disminuir los tiempos de cambio de ancho de pavimentación, preparando el ancho previamente y así no detener la obra en todo el periodo de ajuste de ancho. Además, el segundo tren pavimentador fue necesario para poder iniciar jornadas en distintos frentes, como también para los casos de falla del tren en operación.

8. TERMINACIONES PAVIMENTO

Las terminaciones del pavimento comienzan con la operación del tren pavimentador, que luego de la compactar el hormigón dispuesto en su frente, continúa por repasar la superficie con un platacho para lograr una terminación más plana en el pavimento. La tarea de aplanar lo máximo posible la superficie del pavimento continúa justo detrás del tren pavimentador, en donde una cuadrilla se encargaba de dar los últimos retoques al pavimento, aplanando principalmente los costados de este de manera manual como se ve en la Figura 14.



Figura 14. Alisamiento de la superficie.

Una vez alisada la superficie, una cuadrilla de dos obreros estuvo encargada de realizar el texturado longitudinal haciendo uso de una arpillera del ancho total de la superficie pavimentada como se puede apreciar en la Figura 15.



Figura 15. Texturado de Pavimento

Aledaño a estos últimos dos procesos, para el caso en que el tramo pavimentado estuviera junto a alguna pista aún sin pavimentar, otra cuadrilla estaba encargada de colocar barras de traspaso en el pavimento de hormigón fresco para poder amarrar losas en sus extremos laterales con tramos pavimentados en periodos distintos.

9. CURADO

El proceso de curado del pavimento es altamente necesario en el pavimento debido a la extensión de superficie expuesta a la intemperie. La evaporación del agua superficial en el hormigón depende principalmente de la temperatura ambiente, humedad relativa del aire, temperatura del hormigón y velocidad del viento. Una combinación desfavorable de estas variables puede incrementar la tasa de evaporación de la superficie del hormigón, lo que aumenta el riesgo de fisuración por retracción plástica y además su durabilidad, pero el clima del sector costero en donde se encuentra este proyecto, no genera un escenario muy desfavorable para la pavimentación.

La membrana de curado utilizada para la repavimentación del camino La Pólvara, fue una membrana en base a resina sintética. Las membranas de curado en base a resina tiene la particularidad de no agregar agua a la superficie del pavimento, ya que son basadas en productos sintéticos. Estas, al ser pulverizadas sobre el pavimento, actúan adhiriéndose a la superficie de este, formando una película impermeable y resistente a la lluvia y aire.

Para evitar pérdidas mayores de agua por evaporación del pavimento, la membrana de curado se fue colocando inmediatamente ejecutados los procesos anteriormente descritos manteniendo una distancia entre el proceso de curado y la cuadrilla más adelante, lo que significa entre 20 y 30 minutos después de que el hormigón es procesado por el tren pavimentador. La Figura 16 muestra a un operario colocando la membrana de curado en este proyecto.



Figura 16. Colocación membrana de curado.

10. ASERRADO

Debido al diseño del pavimento en losas cortas, fue necesario un mayor número de cortes en el pavimento para lograr la geometría correspondiente en relación a un pavimento diseñado con métodos tradicionales.

El corte en el pavimento para lograr la modulación de las losas, debe realizarse respetando intervalos de tiempo para poder relajar tensiones que se van generando y así evitar la aparición de fisuras o grietas por corte tardío. El intervalo para iniciar la faena de cortes, comienza en el momento en que se pueda colocar una máquina de corte sobre la superficie del pavimento sin dejar marcadas las huellas (aproximadamente 6 – 8 horas de la pavimentación). Para este proyecto, el tiempo de espera para que las máquinas no dejaran huella tuvo que extenderse al promedio debido al peso de las máquinas utilizadas, ya que máquinas más livianas no fueron capaces de lograr los cortes especificados.

La especificación del diseño establece que los cortes se deben realizar con sierra delgada de al menos 2,5 mm de ancho para evitar el ingreso de partículas dañinas al interior de la junta y el corte debe ser un tercio del espesor de la losa.

Para este proyecto, se utilizaron 5 máquinas autopropulsadas, de las cuales se fueron utilizando 3 a 4 simultáneamente, manteniendo al menos una de repuesto en caso de falla. Los cortes se realizaron con un operario realizando cortes transversales cada 3 juntas y otros dos operarios realizando los cortes en orden desde el mismo punto de partida. El último corte corresponde al corte longitudinal, el cual se muestra en ejecución en la Figura 17. El avance promedio de la ejecución de cortes es de 150 metros lineales hombres-día.



Figura 17. Máquina de Corte

11. PUESTA EN SERVICIO Y MADUREZ

Como se establece en la ASTM C1074, el pavimento sólo podrá ser entregado al tránsito cuando la superficie se encuentre limpia y la resistencia a la flexotracción medida por el método de madurez del último camión colocado en el tramo que se abrirá a tránsito sea igual o superior al 75% de la resistencia característica especificada.

Para este proyecto, se contrató a la empresa especialista para realizar el estudio previo para determinar las curvas de madurez del hormigón utilizado. Con esta información se puede averiguar la madurez requerida del hormigón utilizado para poder poner en servicio el pavimento de la obra. La Figura 18 muestra uno de los gráficos de madurez del estudio previo de este proyecto, en donde se puede ver un comportamiento adecuado del incremento de resistencia según la madurez del hormigón.

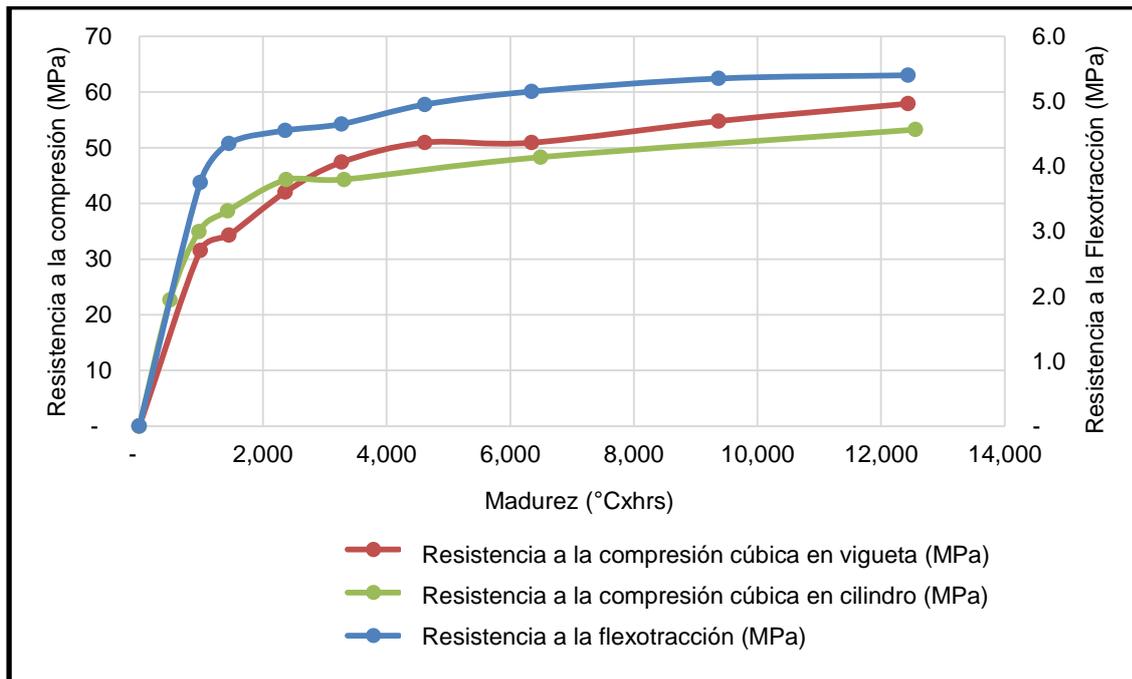


Figura 18. Curva de Madurez

Según los estudios previos realizados y los estudiados durante la Obra, se pudo concluir que los tramos pavimentos estuvieron listos para su puesta en servicio al cabo de 36 horas en promedio una vez pavimentados, lo que facilitó en ocasiones la habilitación de tramos para tener un manejo adecuado del tránsito de vehículos en la carretera durante la obra.

A lo largo del pavimento construido se colocaron termocuplas para poder medir la madurez directa del hormigón colocado como se ve en la Figura 19, las cuales corresponden a sensores que registran temperatura a lo largo del tiempo. Estas fueron colocadas en cada tramo correspondiente al último hormigón vaciado por jornada de pavimentación.

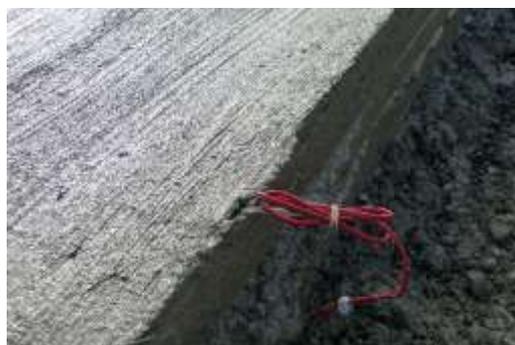


Figura 19. Termocupla introducida en el pavimento

12. CONTROL DE CALIDAD

El control de calidad de esta obra contempla distintos temas que van desde estudios y ensayos previos a la ejecución de esta, como también inspecciones, ensayos y estudios que se realizan durante y después de la Obra para poder mantener estándares de calidad y corroborar si se están cumpliendo exigencias que se establecieron en el contrato.

Para la realización de este proyecto, las bases del mismo obligaron a la empresa constructora a contar con un laboratorio propio en la misma obra, el cual contó con instalaciones para trabajar con probetas de hormigón, áridos y máquinas de ensayos para medir resistencia residual y resistencia a la flexotracción en probetas prismáticas, como también resistencia a la compresión en probetas cilíndricas, entre otros.



Figura 20. Instalaciones de Laboratorio en Obra

La realización de ensayos de áridos y probetas de hormigón es obligatoria para la empresa constructora, además, estos sirven para poder ir verificando la calidad de producción de la planta de hormigón del proyecto. Además del laboratorio en Obra, la calidad de este proyecto fue medida con ensayos obligatorios por el laboratorio de la Inspección Fiscal, como también por el Laboratorio Nacional de Vialidad.

Además de los ensayos que se realizan en el mismo laboratorio de la Obra, también se realizaron ensayos del pavimento durante su construcción para la verificación de la calidad de este. El primer ejemplo de esto, es la realización de ensayos de flexotracción correlacionada con hendimiento y control de espesor con testigos de hormigón obtenidos de distintos puntos del pavimento, en donde las bases del proyecto establecen distintas multas en caso de no cumplir con la calidad especificada. Entre los ensayos de control de calidad que se realizan durante la construcción del pavimento, se realizaron ensayos obligatorios de deflectometría de impacto y mediciones de transferencia de carga, los cuales se realizaron 10 veces por cada kilómetro construido por pista. También se establecieron criterios para asegurar la calidad de cada losa de pavimento construida, proponiendo reemplazos, aceptación, o distintos tratamientos según criterios establecidos por las bases de la licitación.

Uno de los criterios más importantes para controlar la calidad del pavimento construido, es el índice de rugosidad internacional (IRI), el cual determina la regularidad y comodidad de la utilización del pavimento en servicio. La Tabla 3 indica los valores de IRI y las multas respectivas aplicadas en Chile.

Tabla 3. Multas según IRI

IRI (m/km.)	Multa respecto al valor de la capa en el área afectada
$2,0 < \text{IRI} \leq 2,2$	25% o se repara
$2,2 < \text{IRI} \leq 2,5$	50% o se repara
$2,5 < \text{IRI} \leq 2,8$	75% o se repara
$2,8 < \text{IRI}$	100% o se repara

Para el caso de este proyecto, no se pudo lograr el valor de IRI esperado por factores que disminuyeron la velocidad de avance del tren pavimentador, pero de igual forma el avance de cálculo de IRI en los tramos construidos entregó valores de IRI en promedio iguales a 2 m/km.

13. CONCLUSIONES

En vista de la importancia que tiene la repavimentación del Camino la Pólvora tanto para los altos niveles de tránsito que este posee, como también la ingeniería que existe detrás de todo el proyecto, este sirve como prueba o certificación de la tecnología que se está implementando en el área de pavimentación y para demostrar la importancia que tienen distintos estudios previos al proyecto en sí, como el control de calidad durante este.

Para reafirmar la importancia que tiene el Camino la Pólvora en cuanto a nivel de tránsito (189.000.000 de Ejes Equivalentes en diseño), este se puede contrastar con otras rutas importantes de Chile, como la Ruta 5, que en su tramo más concurrido (Santiago – Talca) rodea los 130.000.000 de Ejes Equivalentes. También se puede mencionar la ruta 7 (Santiago – San Antonio), que es una ruta directa para llegar al puerto de San Antonio en Chile, el puerto con mayor volumen en carga transferida en Chile junto al puerto de Quinteros, la cual posee niveles de tránsito que rodean los 30.000.000 de Ejes Equivalentes. Son estos casos de rutas importantes que contrastan y demuestran que el Camino la Pólvora posee valores muy altos de tránsito, lo que exige altos estándares de ingeniería y diseño para esta ruta.

El estudio previo realizado para encontrar la dosificación óptima de hormigón de acuerdo a los materiales dispuestos para la obra, fue un tema importante en la forma de abordar este proyecto que llevó a dos conclusiones principales. La primera es que se demostró que una pequeña inversión en el estudio de realización de mezclas de hormigones, marginal al lado del costo del proyecto entero, significó ahorros significativos por metro cúbico de hormigón dispuesto para la pavimentación, lo que llevó a un gran ahorro en el costo total del proyecto en la fabricación del hormigón. La segunda conclusión respecto al estudio previo de mezclas de hormigón, es que la utilización de los materiales más baratos para la mezcla de hormigón no siempre lleva a un producto óptimo en precio y calidad, por lo que es necesario realizar

este tipo de investigaciones. Esto se demostró con la mezcla de hormigón utilizada, la cual derivó como la óptima en cuanto a precio y calidad sin conformarse de los materiales más baratos a disposición del proyecto.

La calidad de los materiales, el personal de la Obra y las relaciones entre entidades durante el proyecto de repavimentación del Camino la Pólvora fueron clave en la ejecución del proyecto.

En cuanto a la calidad de los materiales, más allá de la mención a la mezcla de hormigón, fue muy comentada la buena calidad de los áridos utilizados en cuanto a su limpieza, sosteniendo que esta es de gran importancia en la resistencia a la flexotracción del hormigón. También se puede destacar la importancia del constante control realizado a los materiales y sus resultados para permanecer con el alto estándar de calidad necesario para este proyecto.

En cuanto al personal de la Obra, se destaca la experiencia de este en proyectos de pavimentación, lo que por un lado facilita y acelera la toma de decisiones en solución de los problemas que pudieran ocurrir y, por otro, tiene un mejor manejo de los equipos y herramientas utilizados en la faena.

La relación entre entidades también fue de gran importancia en el avance de este proyecto. Se puede destacar en este caso la buena relación que existió durante el contrato entre el MOP y el contratista, en donde se da testimonio de que ambas partes estaban consiente de la envergadura del proyecto y muy interesadas en lograr el mejor trabajo posible.

14. REFERENCIAS

1. American Association of State Highways and Transportation Officials, (1993). "AASHTO Guide for Design of Pavement Structures", Washington, Estados Unidos.
2. American Association of State Highways and Transportation Officials, (1998). "Supplement to the AASHTO Guide for Design of Pavement Structures", Washington, Estados Unidos.
3. Covarrubias T, J.P, Covarrubias V, J.P, (2007), Diseño TCP "Pavimentos de concreto con losas de dimensiones optimizadas", TCPavements, Santiago, Chile.
4. Covarrubias T, J.P, (2006), "Concrete Pavements with Small Size Slabs for Heavier Loads or Thinner Slabs", TCPavements, Santiago, Chile.
5. Covarrubias V, J.P, (2012), "Design of concrete slabs with optimized geometry and built in curling effect on performance", TCPavements, Santiago, Chile.
6. Dirección Nacional de Vialidad, MOP, (2014), Antecedentes de licitación pública: Reposición pavimento ruta 60-CH camino La Pólvora, cruce ruta 68-acceso sur a Valparaíso, Chile.

7. Fick, G. and Harrington, D, (2014), Guide to Concrete Overlays: Sustainable Solutions for Resurfacing and Rehabilitating Existing Pavements, tercera edición, Washington, Estados Unidos.
8. Fuenzalida, J, Covarrubias, J.P, Kohler, E, "Estudio de Alabeo en Losas Mediante Perfilometría Láser y su Influencia en los Resultados de IRI", Santiago, Chile.
9. Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón, (1988), Manual del Hormigón, tercera edición, Chile.
10. Litoral Ingeniería Ltda., (2015), Informe Curvas de Madurez Proyecto Ruta CH-60 "Camino La Pólvora", Santiago, Chile.
11. Lyon, M.P, (2016), Análisis del proyecto de reposición del camino La Pólvora con capas de refuerzo de hormigón, Universidad de los Andes, Santiago, Chile.
12. Ministerio de Desarrollo Social, (2012), Anexo IDI – 2013, Reposición ruta 60 CH (La Pólvora) S: CR. Ruta 68 – Puerto (Tunel1), Chile.
13. Shilstone, J. M. Sr., Shilstone, J. M. Jr. (2002), Performance-based concrete mixtures and specifications for today, American Concrete Institute, Michigan, Estados Unidos.
14. Shilstone, James M., Sr., (1990), Concrete Mixture Optimization, American Concrete Institute, Michigan, Estados Unidos.