

Pavimento perpetuo SMA sustentable e impacto económico en concesiones viales: experiencia real con seguimiento de 19 años

Jorge Villarroel
jorge.villarroel@viaschile.cl
Andres García
andres.garcia@viaschile.cl
Cristián Díaz

cristian.diaz@centro-cdi.cl
Francisco Rebolledo
francisco.rebolledo@centro-cdi.cl
Carlos Wahr
carlos.wahr@usm.cl

Sobre la tecnología de los pavimentos SMA, muy difundida por sus supuestos beneficios en desempeño llamados “Pavimentos Perpetuos”, pocos han tenido la oportunidad real de verificar en el largo plazo sus ventajas, especialmente el impacto medio ambiental y económico que generan en el mantenimiento y operación de una autopista de alto tráfico en el largo plazo.

Este trabajo mostrará los estudios de universidades reconocidas por estimar, desde el inicio de la construcción, la duración en el tiempo que se podía esperar de este tipo de pavimentos y especialmente buscar la forma de validación de una alternativa de valorización del número estructural de una capa SMA que pudiera servir de base para modelar en el largo plazo las posibles intervenciones. Se mostrará la evolución real de una carpeta SMA de 19 años de operación y sus seguimientos funcionales y estructurales, hasta un completo seguimiento y evaluación de indicadores de pavimentos anuales, medidos con equipos e instrumental y sus conclusiones.

En una segunda fase se mostrará los impactos financieros reales de administración y gestión del pavimento (curva de gastos), mayor costo inicial que se contrarresta con los beneficios reales en el mantenimiento a lo largo de su vida de servicio. Adicional a lo anterior y dado sus curvas atenuadas, se demuestra que es un pavimento ambientalmente sustentable, mostrando su medición de huella de carbono.

Relacionado con lo anterior, se expondrá la primera experiencia de aplicación de SMA con tecnología de mezcla tibia (WMA), comparando SMA tradicional con: una con aditivos al betún y otra con pellets de fibra de celulosa y cera natural, con buenos resultados de aplicación. Esta experiencia busca reforzar el compromiso y beneficios medioambientales de estos pavimentos sustentables.

Palabras Clave: SMA, operación, sustentabilidad.

Regarding SMA pavement technology, widely spread for its supposed performance benefits called “Perpetual Pavements”, few have had the real opportunity to verify its advantages in the long term, especially the environmental and economic impact that they generate in maintenance and operation of a high-traffic highway in the long term.

This work will show the studies of universities recognized for estimating, initially at the beginning of construction, the duration in time that could be expected of this type of pavements and especially looking for a way to validate an alternative for valuing the structural number of an SMA layer. that could serve as a basis for modeling possible interventions in the long term. The real evolution of an SMA portfolio of 19 years of operation and its functional and structural monitoring will be shown, up to a complete

Pavimento perpetuo SMA sustentable e impacto económico en concesiones viales: experiencia real con seguimiento de 19 años

monitoring and evaluation of annual pavement indicators, measured with equipment and instruments and its conclusions.

In a second phase, the real financial impacts of administration and management of the pavement will be shown (expense curve), a higher initial cost that is offset by the real benefits in maintenance throughout its service life. In addition to the above and given its attenuated curves, it is demonstrated that it is an environmentally sustainable pavement, showing its carbon footprint measurement.

Related to the above, the first application experience of SMA with warm mix technology (WMA) will be presented, comparing traditional SMA with: one with bitumen additives and another with cellulose fiber pellets and natural wax, with good application results. . This experience seeks to reinforce the commitment and environmental benefits of these sustainable pavements.

Keywords: SMA, operation, sustainability.

1. ANTECEDENTES

El proyecto FONDEF D0911174 [1], en que participaron Universidad Técnica Federico Santa María y la Sociedad Concesionaria Autopista Central, investiga especialmente mezclas SMA y mezclas con asfalto modificado. Durante la actividad periódica de conservación del año 2013 se construye este segundo tramo con mezcla SMA en Autopista Central de un espesor de 3 cm entre el km 1600 y el km 600 en pistas 2, 4 y 6. En la etapa de construcción, se toman muestras de terreno y se hacen ensayos de Modulo Dinámico [2] y Resistencia a la Fatiga [3] los cuales son indicados en Tabla 1. Los Módulos Dinámicos y Resistencia a Fatiga se presentan para frecuencias de 10 Hz, y las bandas granulométricas de la mezcla SMA 11-S empleada en Autopista Central y de la mezcla IV-A-12 se encuentran descritas en Manual de Carreteras [4].

Los contenidos de asfalto son 5,3% para la mezcla semidensa IV-A-12 (que no pertenece al tramo, pero sí al proyecto) y 6,8% con 0,3 % de celulosa en pellets para la mezcla SMA del tramo. Cabe mencionar la impor-

tancia de la contribución de la estructura del agregado de la SMA (del tipo discontinuo), donde los agregados se distribuyen formando un esqueleto pétreo altamente resistente.

En resumen, se observa en ensayos de laboratorio que la mezcla SMA tiene un mayor módulo dinámico y un mejor comportamiento a fatiga que la mezcla IV-A-12 con asfalto modificado.

El año 2013 la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM), a solicitud de Autopista Central, hace un estudio [5] cuyo objetivo principal es comparar el deterioro de distintas mezclas frente a las sollicitaciones de terreno para así poder estimar la durabilidad de las distintas modalidades de intervención y, en consecuencia, adecuar los planes de conservación de la ruta.

Para llevar a cabo el estudio, se utiliza el software de la Guía de Diseño Empírica Mecanicista [6] por medio del cual se calibran los modelos de predicción de agrietamientos por fatiga, agrietamiento térmico y ahuellamiento, ajustándolos a las condiciones locales de la ruta.

Sin embargo, dado que no se contaba con información de seguimiento de deterioro de las mezclas SMA,

Tabla 1. Módulos Dinámicos y Resistencia a Fatiga en mezclas tipo SMA 11S y IV-A-12

| Módulo Dinámico a 10Hz, MPa | | | Fatiga a 20°C y 10Hz, N° repeticiones a falla | | |
|-----------------------------|--------------------|--------------------|---|--------------------|--------------------|
| °C | SMA S11 PG76-28 | IV-A-12 PG76-22 | mm/mm x10 ⁻⁶ | SMA S11 PG76-28 | IV-A-12 PG76-22 |
| -10 | 18.655 | 12.307 | 750 | 60.693 | 10.816 |
| 4 | 10.732 | 6.990 | 500 | 237.261 | 58.035 |
| 21 | 3.912 | 2.455 | 450 | 475.261 | |
| 37 | 1.194 | 626 | 350 | 4.302.2995 | 687.896 |
| 54 | 432 | 283 | 300 | | 1.898.308 |

se simula su comportamiento utilizando los resultados de calibración de la mezcla tradicional y se aplican relaciones de laboratorio en base a ensayos de fatiga y rueda de Hamburgo. La simulación para agrietamiento y ahuellamiento (ver Figura 1) fue demasiado conservadora para agrietamiento de la SMA, según se ha comprobado en auscultaciones de deterioros de pavimentos que se presentan en Figura 2, cuyos datos fueron obtenidos en seguimientos efectuados anualmente hasta el año 2020.

gación durante el período de explotación los siguientes parámetros funcionales y estructurales: no se deben superar en agrietamiento un 10%, equivalente a 700 m/km y de ahuellamiento de 15 mm, en IRI 3,5 m/km y en fricción 0,40.

Según se verifica a la fecha, las mezclas SMA superan sobradamente el comportamiento pronosticado en agrietamiento, y en ahuellamiento se considera adecuado lo pronosticado según se observa en Figura 2 durante el período comprendido entre 2013 y 2021, y es muy



Figura 1. Agrietamiento y Ahuellamiento pronosticado [5]

El seguimiento de los deterioros del tramo SMA con ligante PG 76-28 de 3 cm comprende valores de agrietamiento lineal (m), ahuellamiento (mm), de IRI (m/km) y fricción (mm). Las Bases Administrativas de Licitación (BALI) que rigen a la Concesión establecen como obli-

probable que a los 20 años se encuentren con un deterioro que cumpla los límites de las BALI. En consecuencia, la mezcla SMA puede considerarse como carpeta de rodadura de una estructura denominada de vida extendida o perpetua.

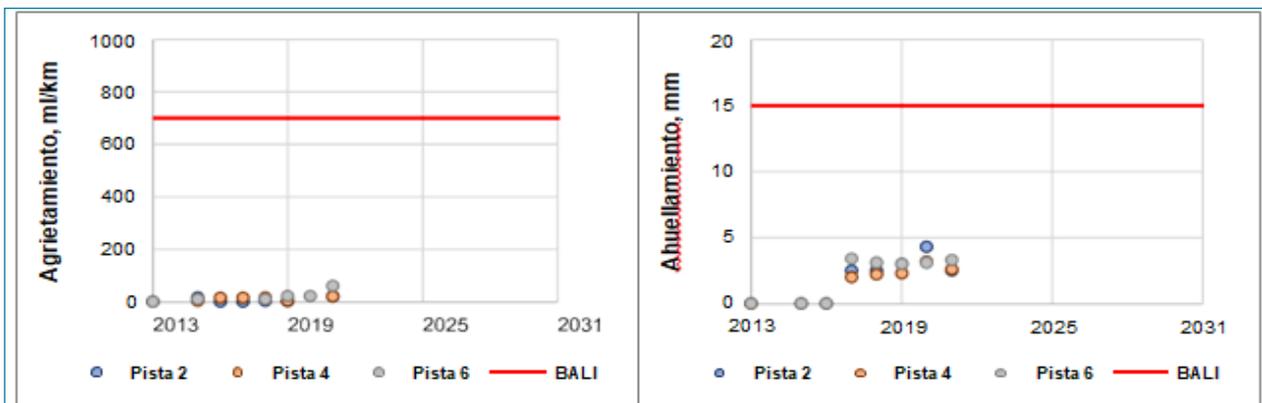


Figura 2. Agrietamiento y Ahuellamiento real

Pavimento perpetuo SMA sustentable e impacto económico en concesiones viales: experiencia real con seguimiento de 19 años

En la Figura 3 se puede observar el buen comportamiento de los indicadores funcionales controlados entre 2013 y 2021.

cientemente estructural y espesor de la capa y no se relaciona con estos deterioros. El coeficiente estructural está relacionado con el tipo de mezclas según se emplee para ca-

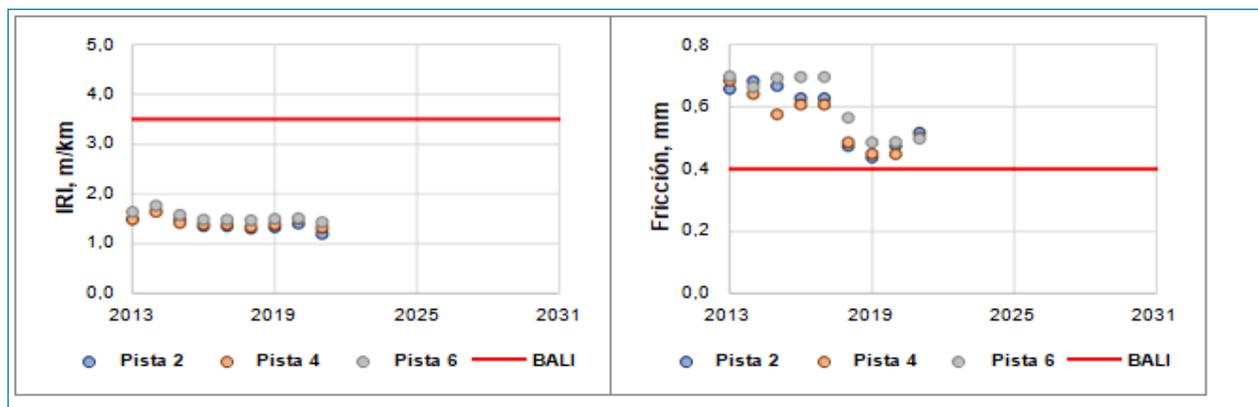


Figura 3. IRI y Fricción real

Las evaluaciones estructurales en este tramo efectuadas en 2017 y 2020 muestran que el Do, deflexión bajo la placa de carga, es menor a 200×10^{-6} y el número estructural (SN) es superior a 14,2 cm lo que indica una muy buena capacidad estructural.

1.1 Número estructural de carpeta de rodadura

El método de diseño AASHTO 93 es un método empírico que considera que el número estructural (SN) se determina con la ecuación de diseño y depende del Módulo Resiliente de la subrasante (Mr), de la cantidad de ejes equivalentes (EE), la confiabilidad de diseño (R), la serviciabilidad inicial (pi) y final (pf). El clima se considera por medio de los coeficientes de drenaje (mi) y las propiedades de la mezcla con los coeficientes estructurales(ai).

La limitación que tiene el diseño de pavimentos en su aplicación práctica en Chile es que no permite introducir innovación: por ejemplo, el coeficiente estructural de capas de rodadura es 0,43 en Manual de Carreteras para la capa de rodadura de una mezcla de graduación semidensa con ligante tradicional, con ligante modificado con polímero o mezcla del tipo SMA, por lo que el espesor de la capa resultante es el mismo. Además, en el diseño de pavimentos no se puede diferenciar desempeño de la mezcla asfáltica en agrietamiento o ahuellamiento ya que el número estructural depende de coefi-

pa rodadura, intermedia o base asfáltica y en menor medida con el módulo resiliente de la mezcla hoy no empleado en diseño de pavimentos.

El diseño empírico-mecanicista de pavimento [7] considera como criterio de falla el agrietamiento (fatiga, térmico), el ahuellamiento y el IRI, mientras que el diseño AASHTO 93 [8] sólo emplea la serviciabilidad como falla.

Sin embargo, hay un intento de adoptar coeficientes estructurales mayores según características de la mezcla asfáltica en el Informe Final (2019) del proyecto del Departamento de Transporte de Florida "Structural Coefficient for High Polymer Modified Asphalt Mixes" [9], en el que se propone un coeficiente estructural de 0,54 para mezcla asfáltica altamente modificada (ligante modificado con 7,5% de polímero del tipo SBS); la comparación se efectúa con mezclas modificadas con 3% de polímero de tipo SBS (coeficiente 0,44). No obstante, debe mencionarse que el Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos de Florida de 2020 [10] aún mantiene el coeficiente estructural tradicional de 0,44.

Se desconoce el porcentaje de SBS empleado en los ligantes PG76-28 y PG76-22 de las mezclas ensayadas pero considerando que la mezcla SMA tiene un ligante asfáltico PG76-28, además el valor del módulo dinámico de la mezcla SMA es mayor al de la mezcla semi densa IV- A-12 para todas las frecuencias (velocidades de los vehículos) y temperaturas, se sugiere la posibilidad de considerar un coeficiente estructural mayor para la mez-

cla SMA en las condiciones de la mezclas construidas, lo que resulta en una disminución de espesor que se compensa con mayor capacidad estructural cuyo origen es el aumento del Módulo, pero no es posible generalizar ni determinar su valor con los antecedentes disponibles.

2. SMA CONSTRUIDA EN 2002, INDICADORES FUNCIONALES Y ESTRUCTURALES

Se presentan los indicadores funcionales (ver Figura 4) y estructurales (ver Figura 5) del primer tramo de mezcla SMA construida en el año 2002 y reconstruida después de 19 años de servicio, donde se puede ratificar y observar un muy buen desempeño de los indicadores funcionales en el largo plazo (19 años).

2.1 Testigos extraídos de primer tramo de mezcla SMA 2002

Luego de 19 años de funcionamiento de la mezcla SMA en Autopista Central, se realizó una auscultación del pavimento que consistió en la extracción de una serie de testigos (núcleos de asfalto) para realizar una caracterización de sus propiedades de desempeño y reología del ligante asfáltico recuperado. Se extrajeron 25 testigos (9 sanos y 16 fisurados) en noviembre de 2020, en las tres pistas dirección sur-norte de Autopista Central, de acuerdo con la distribución indicada en Figura 6.

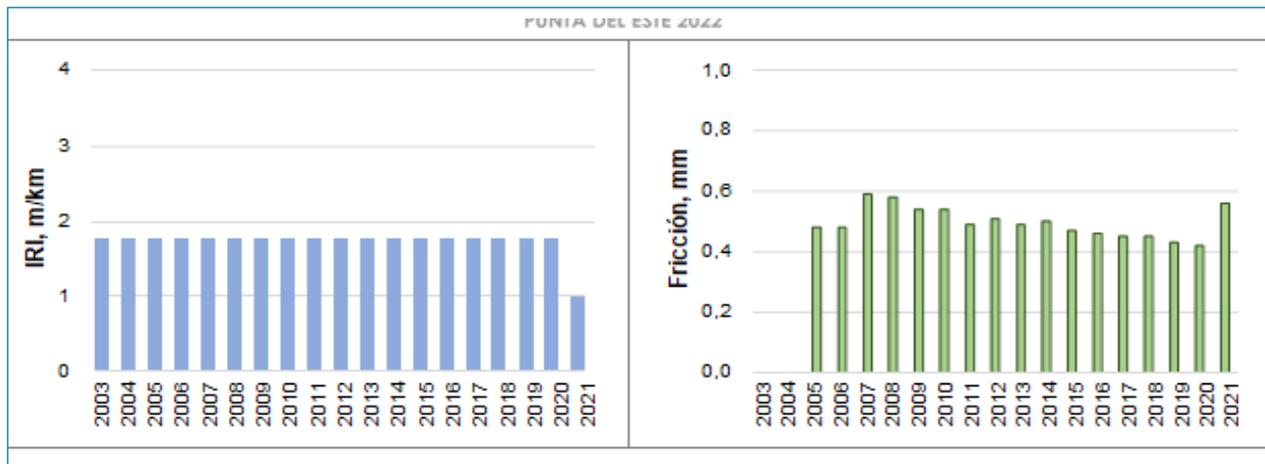


Figura 4. Indicadores funcionales, IRI y Fricción

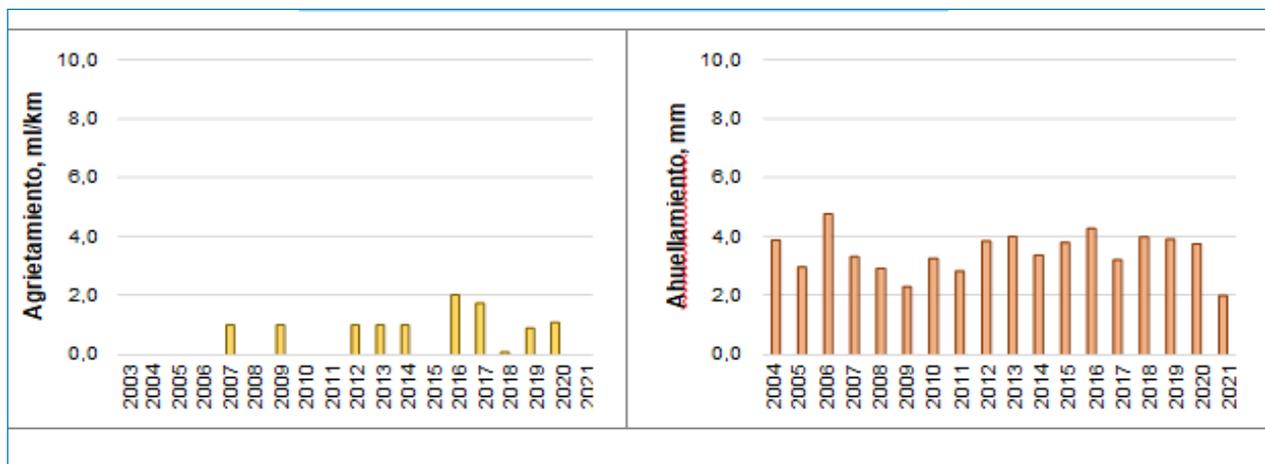


Figura 5. Indicadores estructurales, Agrietamiento y Ahuellamiento

Pavimento perpetuo SMA sustentable e impacto económico en concesiones viales: experiencia real con seguimiento de 19 años

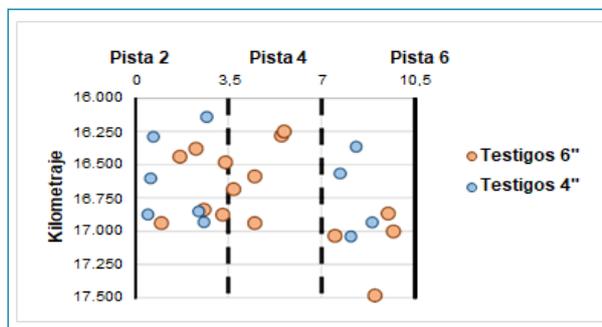


Figura 6. Esquema de ubicación de testigos extraídos en pistas 2, 4 y 6 de Autopista Central

Los testigos fueron extraídos considerando las condiciones de estructuración de las 3 pistas de la sección de ensayo en conjunto con la condición estructural de las zonas de extracción de los testigos. La sección transversal de la autopista se indica en la Figura 7.

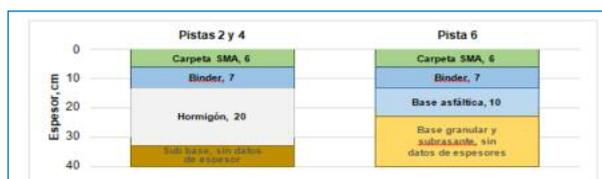


Figura 7. Estructura de pavimento [11]

2.2 Análisis de testigos de SMA

Se realizaron mediciones de espesores, propiedades volumétricas, Módulo de Rigidez a 15 °C y Resistencia

al Ahuellamiento Hamburgo (solo carpeta SMA y en carpeta SMA con capa inferior) en los testigos sanos del pavimento. Con los testigos dañados se realizan ensayos de contenido de asfalto, granulometría y densidad máxima teórica de la mezcla, cuyos resultados promedio se indican en Tabla 2 y Figura 8, además del análisis de los áridos y del ligante recuperado promedio de los testigos (ver Tabla 3).

De los resultados de ahuellamiento y Módulo de Rigidez se aprecia que la carpeta de rodadura SMA mantiene una buena estructura (ver Tabla 2), considerando que la granulometría de los testigos ha tenido cambios y la resultante hoy es un poco más fina que lo dosificado inicialmente según se muestra en Figura 8, situación que resulta lógica después del tiempo transcurrido y exposición al tráfico y cargas.

Como se aprecia en la Tabla 3, el envejecimiento y la rigidez del ligante recuperado de testigos es consistente con lo esperado para una mezcla asfáltica con 19 años en servicio.

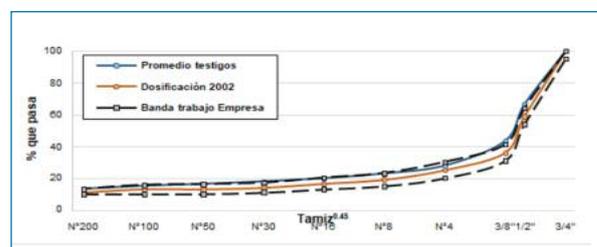


Figura 8. Comparativo de granulometría de testigos y dosificación de mezcla SMA 2002

Tabla 2. Ensayes de capa SMA en testigos extraídos

| Propiedades de testigos SMA | Resultado | Método |
|---|-----------|----------------------|
| Espesor, mm | 55 | 8.302.41 [4] |
| DMM, kg/m ³ | 2409 | 8.302.37 [4] |
| Densidad, kg/m ³ | 2323 | 8.302.38 [4] |
| Vacíos, % | 3,6 | - |
| Módulo de Rigidez a 15°C, MPa | 9089 | UNE-EN- 2697-26 [12] |
| Resistencia al ahuellamiento a 60°C en seco | | UNE-EN-12697-22 [13] |
| Espesor carpeta SMA, cm | 5,6 | - |
| Deformación a 20000 pasadas, mm | 4,9 | - |
| Espesor carpeta SMA + capa inferior, cm | 10,3 | - |
| Deformación a 20000 pasadas, mm | 2,1 | - |
| Contenido de asfalto, % ref. agregado | 6,66 | 8.302.36 [4] |
| Fibra, % ref. agregado | 0,37 | - |

Tabla 3. Ensayes en ligante recuperado de testigos SMA en Rotavapor

| Ensayo | Resultado | Método |
|--|-----------|------------------|
| Penetración a 25°C, dmm | 12 | 8.302.3 [4] |
| Punto de ablandamiento, °C | 73,8 | 8.302.16 [4] |
| Ductilidad a 15°C, cm | 0,5 | 8.302.8 [4] |
| Viscosidad a 135°C, Pa s | 3,0 | 8.302.24 [4] |
| Temperatura crítica alta, °C (>2,2 kPa) | 89,0 | AASHTO T315 [14] |
| Temperatura crítica intermedia, °C (<5000 MPa) | 28,7 | AASHTO T315 [14] |
| MSCR a 64°C | | AASHTO T350 [15] |
| R3.2, % | 29,6 | |
| Jnr3.2, 1/kPa | 0,09 | |

3 EVALUACIÓN FINANCIERA

Para mostrar las ventajas financieras reales del empleo de esta tecnología y su impacto en las curvas financieras de largo plazo, a continuación, se presenta de manera real los gastos que ha tenido el tramo SMA monitoreada versus una carpeta tradicional modelada por HDM4 (Tabla 4). Los datos contienen intervencio-

nes modeladas y valoradas del área en cuestión, mientras que la Tabla 5 muestra los datos de las actividades reales ejecutadas en el mantenimiento del tramo SMA en 19 años. La diferencia es notable dado que los costos se reducen a un tercio, pasando de USD 223.476 a USD 82.057, para el período monitoreado en una autopista de alto tráfico con 90.000.000 ejes equivalentes de diseño y un IMD de 12.000 vehículos pesados.

Tabla 4. Conservación Tradicional Modelada (2003 - 2022)

| Cantidad de Obras | | | | Monto de Obras, USD \$ | | | | |
|-------------------|-------------------|------------------------------|------------------|------------------------|-------------------|--------------------------|--------------|--------|
| Actividad | Sello grietas, ml | Fresado y resopición 6cm, m2 | Recapado 5cm, m2 | Actividad | Sello grietas, ml | Fresado y resopición 6cm | Recapado 5cm | Total |
| 2003 | | | | 2003 | - | - | - | - |
| 2004 | | | | 2004 | - | - | - | - |
| 2005 | | | | 2005 | - | - | - | - |
| 2006 | 240 | | | 2006 | 656 | - | - | - |
| 2007 | | | | 2007 | - | - | - | -656 |
| 2008 | | 2265 | | 2008 | - | 38.431 | - | 38.431 |
| 2009 | | | | 2009 | - | - | - | - |
| 2010 | 180 | | | 2010 | 492 | 15.372 | - | 492 |
| 2011 | | 906 | | 2011 | - | - | - | 15.372 |
| 2012 | 340 | | | 2012 | 930 | - | - | 930 |
| 2013 | | 3172 | | 2013 | - | 53.803 | - | 53.803 |
| 2014 | | | | 2014 | - | - | - | - |
| 2015 | 130 | | | 2015 | 355 | 29,6 | - | 355 |
| 2016 | | 906 | | 2016 | - | 15.72 | - | 15.372 |
| 2017 | 410 | | | 2017 | 1.121 | - | - | 1.121 |
| 2018 | | | 9062 | 2018 | - | - | 87.864 | 87.864 |
| 2019 | | | | 2019 | - | - | - | - |

Pavimento perpetuo SMA sustentable e impacto económico en concesiones viales: experiencia real con seguimiento de 19 años

| | | | | | | | | |
|-------|------|------|------|-------|-------|---------|--------|---------|
| 2020 | 130 | 906 | | 2020 | 355 | - | - | 355 |
| 2021 | | | | 2021 | - | - | - | - |
| 2022 | 380 | 453 | | 2022 | 1.039 | 7.686 | - | 8.725 |
| Total | 1810 | 7702 | 9062 | Total | 4.948 | 130.664 | 87.864 | 223.476 |

Tabla 5. Tramo SMA, Conservación Real Ejecutada (2003 - 2022)

| Cantidad de Obras | | | | Monto de Obras, USD \$ | | | | |
|-------------------|-------------------|------------------------------|-------------|------------------------|-------------------|--------------------------|---------|--------|
| Actividad | Sello grietas, ml | Fresado y resopición 5cm, m2 | SMA 3cm, m2 | Actividad | Sello grietas, ml | Fresado y resopición 5cm | SMA 3cm | Total |
| 2003 | | | | 2003 | - | - | - | - |
| 2004 | | | | 2004 | - | - | - | - |
| 2005 | | | | 2005 | - | - | - | - |
| 2006 | | | | 2006 | - | - | - | - |
| 2007 | 92 | | | 2007 | 252 | - | - | 252 |
| 2008 | | | | 2008 | - | - | - | - |
| 2009 | 184 | | | 2009 | 503 | - | - | 503 |
| 2010 | | | | 2010 | - | - | - | - |
| 2011 | | | | 2011 | - | - | - | - |
| 2012 | 290 | 290 | | 2012 | 793 | - | - | 793 |
| 2013 | 310 | | | 2013 | 848 | - | - | 848 |
| 2014 | 156 | | | 2014 | 426 | - | - | 426 |
| 2015 | | | | 2015 | - | - | - | - |
| 2016 | 210 | | | 2016 | 574 | - | - | 574 |
| 2017 | | 703 | | 2017 | - | 9.938 | - | 9.938 |
| 2018 | | | | 2018 | - | - | - | - |
| 2019 | | | | 2019 | - | - | - | - |
| 2020 | 250 | | | 2020 | 683 | - | - | 683 |
| 2021 | | | 9062 | 2021 | - | - | 68.040 | 68.040 |
| 2022 | 1492 | 703 | | 2022 | - | - | - | - |
| Total | 1810 | 7702 | 9062 | Total | 4.079 | 9.938 | 68.040 | 82.057 |

3.1 Construcción y conservación a largo plazo de tramo en estudio

Con la información anterior, se extrapola el ejercicio a la autopista completa la cual consta de 361 km de pista, y se hace una evaluación respecto de los ahorros que hubieran resultado en caso de haber ejecutado el 100% con la solución SMA. Se considera incluir en el análisis el costo superior de construcción inicial que se muestra,

donde la diferencia es 31% más cara con solución SMA. Dada esta situación, se buscó bajar el costo mediante la reducción del espesor en 1 cm, asumiendo mayor capacidad estructural, y se ha reemplazado 6 cm de mezcla tradicional por 5 cm de SMA con sus costos asociados. De la Tabla 6 se obtienen los costos reales de mantenimiento donde se detecta una disminución del 63% del gasto. La suma de construcción y conservación muestra un ahorro real de 37%.

Tabla 6. Coste de construcción y conservación de tramo en estudio (9.000 m²)

| Tipo Mezcla Rodadura | Total construcción, | Total conservación, | Total, USD |
|----------------------|---------------------|---------------------|------------|
| Tradicional 6 cm | 86.798 | 223.476 | 310.274 |
| Especial SMA 5 cm | 113.399 | 82.057 | 195.456 |
| Diferencia % | +31% | -63% | -37% |

3.2 Construcción y conservación de largo plazo de Concesión completa

De manera real, la autopista al día de hoy tiene un 20 % de sus activos de pavimento en SMA lo que ya ha generado ahorros importantes. En la Tabla 7 y Tabla 8 se valoriza el supuesto de haber ejecutado el 100 % de autopista con esta solución SMA.

Tabla 7. Km Carril Existente

| SMA Existente Km Carril, ml | Total Km Carril Vía Expresa, ml |
|-----------------------------|---------------------------------|
| 71.458 | 361.360 |

Tabla 8. Coste de conservación solución tradicional vs SMA

| Tipo Mezcla Rodadura | Total construcción, | Total conservación, | Total, USD |
|----------------------|---------------------|---------------------|------------|
| Tradicional 6 cm | 12.114.800 | 46.656.152 | 58.770.953 |
| Especial SMA 5 cm | 15.827.703 | 17.131.386 | 32.959.089 |
| Diferencia % | +31% | -63% | -44% |

Las diferencias porcentuales son relevantes al momento de ser valorizadas ya que el sobre coste de 31% en construcción implica un gasto mayor de USD 3,7 Millones frente al ahorro global de largo plazo del 44% equivalente a USD 26 Millones (Construcción más mantenimiento).

4. SOFTWARE PARA LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL GAIA

Las ventajas financieras vistas anteriormente, resultan también ser ventajas medio ambientales. Desarrolla-

do por Eurovia, GAIA es un software que permite evaluar con precisión el impacto medioambiental de un proyecto de pavimentación vial. Basado en el método de análisis del ciclo de vida del pavimento, desde la extracción de las materias primas hasta la colocación de la solución de pavimento asfáltico, el software permite cuantificar y comparar las ventajas medioambientales de utilizar distintas alternativas de pavimentos a partir de 16 indi-

cadore ambientales, incluyendo aquellos de la norma europea NF P 01-010 [16].

Realizando simulaciones con el software GAIA, en la Figura 10 se ejemplifica el impacto, en kg de CO₂ equivalente, de fabricar mezcla asfáltica para un tramo de 100 m; dado que el espesor utilizado en mezclas SMA es más bajo que el de mezclas tradicionales, el impacto ambiental también es comparativamente menor.

La diferencia mostrada en gráficas, se duplica si consideramos el plazo extendido de intervención por mantenimiento pues la necesidad de recursos será menor

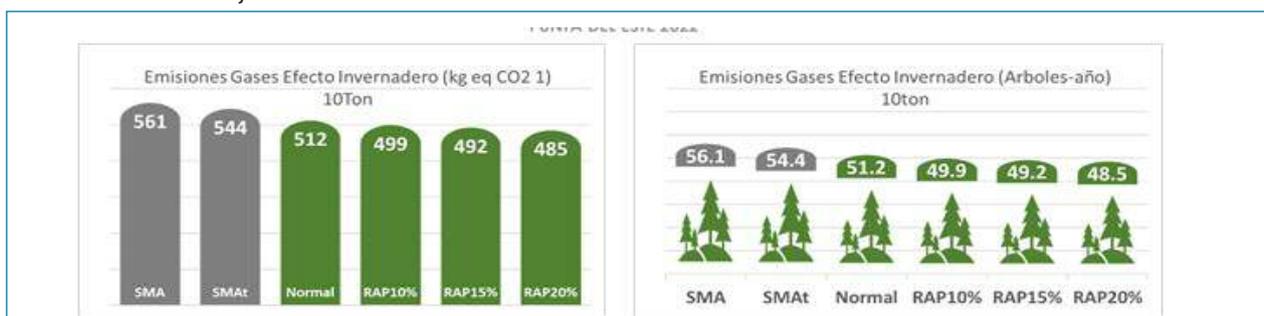


Figura 9. Comparativa de emisión de GEI por fabricación de 10 ton de mezcla

Pavimento perpetuo SMA sustentable e impacto económico en concesiones viales: experiencia real con seguimiento de 19 años

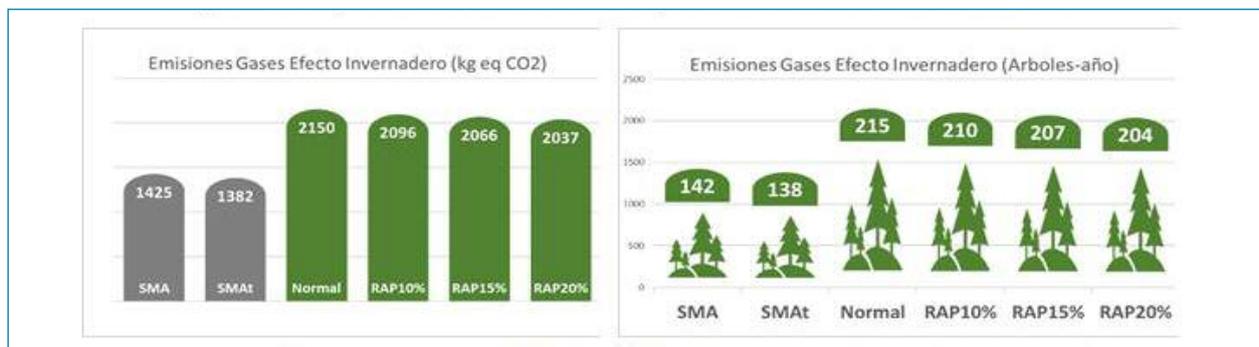


Figura 10. Comparativa de emisión de GEI por fabricación de mezcla para tramo de 100m en dos espesores; 3 cm para SMA y 5 cm para mezclas convencionales con y sin RAP.

5. TRAMO DE PRUEBAS DE MEZCLA SMA CON TECNOLOGÍA TIBIA

El 4 de diciembre de 2021, en jornada nocturna, se construye en Autopista Central el primer tramo de pruebas de SMA con dos tecnologías de mezcla tibia (Evotherm y Viatop CT40), como se indica en la Figura 11. La dosificación de la mezcla consideró utilizar la banda 0/11 S StB 07, con 6,8% de ligante asfáltico modificado con polímeros PG76-22 (referido al peso del agregado) y aditivos Evotherm y fibras Viatop 66 y CT40. La mezcla SMA de referencia, en caliente, se fabricó a 178°C y compactó a 149°C, mientras que las mezclas tibias se fabricaron a 156°C y compactaron a 140°C.

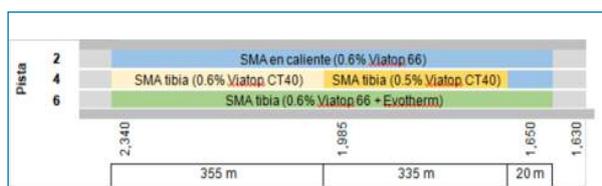


Figura 11. Esquema de colocación de mezclas

Al analizar el ligante recuperado de las formulaciones de las mezclas SMA en caliente y tibia con Evotherm, se aprecia una disminución del envejecimiento del ligan-

te al incorporar aditivos de mezcla tibia por efecto de la disminución de la temperatura de mezclado (ver Tabla 9).

Durante la fabricación de las mezclas SMA para la ejecución del tramo de prueba, se realiza el muestreo de estas para fabricación de probetas en laboratorio, a las cuales se les midió el Módulo de Rigidez a 15°C y Resistencia al Ahuellamiento Hamburgo en seco y en agua (ver Tabla 10).

Una vez finalizada la construcción del tramo de pruebas, se realiza la medición de microtextura y macrotextura de la carpeta de rodado con SMA (ver Tabla 11).

6. CONCLUSIONES

La prueba generada en el 2002 en Autopista Central ha permitido visualizar claramente las ventajas de estos pavimentos apodados perpetuos.

Si bien inicialmente no se podía determinar directamente el número estructural o ciclo de intervención de mantenimiento para la SMA, el tramo de prueba ha demostrado que el ciclo es muy superior a una mezcla tradicional. El seguimiento de indicadores funcionales muestra una evolución bastante baja de ellos en el tiempo, lo que incide claramente en la reducción de intervenciones

Tabla 9. Análisis ligante recuperado de mezclas SMA en caliente y tibia

| Mezcla asfáltica SMA | Total construcción, | Total conservación, | Total, USD |
|---|---------------------|---------------------|------------------|
| Viscosidad a 135°C, Pa s | 2,4 | 1,7 | 8.302.24 [4] |
| Temperatura crítica alta, °C (>2,2 kPa) | 80,3 | 75,0 | AASHTO T315 [14] |
| MSCR a 64°C | | | AASHTO T350 [15] |
| R3.2, % | 74,1 | 70,4 | - |
| Jnr3.2, 1/kPa | 0,15 | 0,31 | - |

Tabla 10. Módulo de Rigidez y Resistencia al ahuellamiento de probetas con mezcla de producción

| Mezcla SMA | Caliente | Evotherm | CT40 0.6% | CT40 0.5% | Método |
|--|----------|----------|-----------|-----------|----------------------|
| Módulo de Rigidez a 15°C, MPa | 5138 | 4730 | 5833 | 57,30 | UNE-EN- 2697-26 [12] |
| Resistencia al ahuellamiento a 60°C en seco, deformación a | 3,2 | 2,1 | 2,1 | 2,0 | UNE-EN-12697-22 [13] |
| Resistencia al ahuellamiento a 50°C en agua, deformación a | 5,3 | 3,6 | 3,2 | 3,2 | UNE-EN-12697-22 [13] |

Tabla 11. Auscultaciones de mezclas SMA durante la construcción

| Parámetro | Microtextura, BPNa [4] | | | | Macrotextura, mm [4] | | | |
|-----------------------|------------------------|----------|-----------------|-----------|----------------------|----------|-----------------|-----------|
| | Caliente | Evotherm | Tibia CT40 0.6% | CT40 0.5% | CT40 0.5% | Evotherm | Tibia CT40 0.6% | CT40 0.5% |
| Mezcla SMA | | | | | | | | |
| Construcción 05/12/21 | 76,8 | 73,0 | 81,4 | 89,4 | 1,28 | 1,01 | 1,08 | 1,40 |

de largo plazo y por tanto de los costos.

De la cuantificación financiera real, es notable el ahorro general en las curvas de largo plazo, más aún al considerar construcción y mantención dado que, la recuperación del mayor gasto inicial en construcción se diluye rápidamente en el ahorro generado por el mantenimiento.

En cuanto a los análisis de laboratorio de las mezclas recuperadas del tramo construido en 2002, claramente se aprecia el envejecimiento del ligante asfáltico y que debería resultar de un mayor daño al que se observa hoy de manera real. Por tanto, la matriz granular con el mastic con fibra demuestra claramente sus grandes prestaciones.

Desde el punto de vista medio ambiental, la metodología incluida en GAIA ha permitido visualizar la baja en emisión de gases contaminantes, dado el menor espesor del equivalente estructural de una mezcla SMA y por tanto el menor volumen de producción necesario para cubrir la carpeta de rodadura a similares condiciones estructurales que una mezcla tradicional. Se verifica que el uso de esta técnica de mantenimiento es un aporte al medio ambiente, pero definitivamente el mayor aporte se encuentra en el espaciamiento de las intervenciones de mantención y menor necesidad de mezclas nuevas de reconstrucción dado su mayor ciclo de vida. Para aumentar la condición de ser amistoso con el medio am-

biente, ya se encuentra en implementación en la autopista la técnica de mezcla tibia para SMA con fibras ya modificadas con aditivo en base a ceras. La aplicación ha mostrado sus bondades en la fabricación y colocación y ya se realiza un seguimiento de su evolución funcional y estructural de estas.

7. REFERENCIAS

[1] UTFSM. Informe FONDEF D0911174 (2011-2013). Desarrollo de Materiales para Recapados Asfálticos utilizados en la Rehabilitación de Pavimentos Deteriorados.

[2] AASHTO TP 62 (2003). Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures. Washington, D.C., AASHTO.

[3] AASHTO T321 (2007). Standard Method of Test for Determining the Fatigue Life of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending. Washington, D.C., AASHTO.

[4] Dirección de Vialidad (2021). Manual de Carreteras. Ministerio de Obras Públicas de Chile.

[5] Delgadillo R., Wahr C. (2013). Estudio de ajuste de los Planes de Mantenimiento por uso de materiales de alto desempeño. CEII UTFSM Autopista Central.

[6] AASHTO (2013). Software AASHTOWare Pavement ME Design. Washington, D.C., AASHTO.

Pavimento perpetuo SMA sustentable e impacto económico en concesiones viales: experiencia real con seguimiento de 19 años

- [7] ARA, Inc. (2004). Guide for Mechanistic-Empirical Design. Washington D.C., ERES Consultants Division, Transportation Research Board of the National Academies, National Cooperative Highway Research Program NCHRP, Project 1-37A.
- [8] AASHTO (1993). AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. Washington, D.C., AASHTO.
- [9] Habbouche J., Hajj E., Sebaaly P. (2019) Structural Coefficient for High Polymer Modified Asphalt Mixes. Pavement, Engineering & Science Program Department of Civil and Environmental Engineering, University of Nevada Reno, Florida Department of Transportation.
- [10] FDOT (2020). Flexible Pavement Design Manual. Florida Department of Transportation, Office of Design.
- [11] Águila, M. (2004). Estudio de Mezclas Asfálticas Tipo Stone Mastic Asphalt, Memoria para optar al título de Constructor Civil. Santiago, Universidad Andrés Bello.
- [12] European Committee for Standardization (2006). Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezcla bituminosa en caliente. Parte 26: Rigidez. Anexo C. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación.
- [13] European Committee for Standardization (2008). Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 22: Ensayo de rodadura. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación.
- [14] AASHTO T315 (2021). Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR). Washington, D.C., AASHTO.
- [15] AASHTO T350 (2019). Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR). Washington, D.C., AASHTO.
- [16] European Committee for Standardization (2005). Déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction - Qualité environnementale des produits de construction, déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction. AFNOR.