

Estabilización mediante reciclado con Asfalto Espumado en RN3 Uruguay

José Martucci,
jolumartu@gmail.com

Oscar Giovanon,
ogiovanon@gmail.com

En busca de soluciones estructurales para la rehabilitación de pavimentos de carretera que sean eficientes, pero al mismo tiempo que sean económicas e impacten el mínimo posible en la dinámica de operación de la red de carreteras, se ha optado por la valoración de la metodología de reciclado en sitio en frío mediante la estabilización con asfalto espumado.

Luego de resumir diferentes aspectos citados en la bibliografía internacional respecto al comportamiento en servicio de este material. Se aborda el objetivo de valorar el comportamiento estructural de este material en su primera utilización en Uruguay, dentro de la Ruta Nacional 3.

Se valoró, en distintas oportunidades, el módulo de trabajo de la capa de Estabilizado mediante la medición de deflectometría dinámico por impacto (FWD) y la aplicación de la técnica de retroajuste modular.

En una de las mediciones deflectométricas se aplicaron diferentes niveles de carga con el objetivo de valorar el comportamiento no lineal del material, pudiendo observarse un moderado aumento del módulo al aumentar la carga aplicada.

Se compara además la predicción de la vida útil aplicando dos metodologías de diseño mecanicistas, las que auguran un buen comportamiento de la obra realizada. Esta circunstancia es validada actualmente por el buen estado del tramo luego de tres años de comportamiento en servicio.

Poniéndose finalmente énfasis en la importancia del seguimiento de tramos en servicio, que permitan el ajuste de las metodologías a las particularidades locales, lográndose así una mayor certeza en las predicciones del comportamiento de las obras a proyectar.

Palabras Clave: Asfalto Espumado, Modelización, Retroajuste Modular.

In search of structural solutions for the rehabilitation of road pavements that are efficient, but at the same time that they are economical and have the least possible impact on the operation dynamics of the road network, the evaluation of the recycling methodology has been chosen. cold site by stabilizing with foamed asphalt.

After summarizing different aspects cited in the international literature regarding the in-service behavior of this material. The objective of evaluating the structural behavior of this material in its first use in Uruguay, within National Route 3 is addressed.

The working modulus of the Stabilized layer was assessed on different occasions by measuring Falling Weigh Deflectometer (FWD) and applying the back calculation of modulus technique.

In one of the deflectometric measurements, different load levels were applied in order to assess the non-linear behavior of the material, and a moderate increase in modulus could be observed with increasing applied load.

In addition, the prediction of the useful life is compared by applying two mechanistic design methodologies, which predict a good performance of the work carried out. This circumstance is currently validated by the good condition of the section after three years of service behavior.

Finally putting emphasis on the importance of the follow-up of sections in service, which allow the adjustment of the methodologies to local particularities, thus achieving greater certainty in predicting the behavior of the works to be projected.

Keywords: Foamed Asphalt, Modeling, Back Calculation.

1. INTRODUCCIÓN

El reciclado en frío in situ con asfalto espumado (AE) consiste en la trituración del pavimento existente, y el aporte de nuevo material si fuese necesario. A este material resultante de la pulverización se le inyecta a través de una máquina recicladora especial dentro de una cámara de expansión cemento asfáltico, agua y aire comprimido para formar con el agregado fino una pasta que aglutina los agregados gruesos provenientes del pulverizado de los materiales existentes.

El proceso del asfalto espumado se realiza cuando en una cámara de expansión al asfalto (160°C a 180°C), se le inyecta agua fría (1 a 3% del peso del asfalto) y aire comprimido, este intercambio calorífico eleva la temperatura del agua a 100°C, produciéndose burbujas, la espuma se inyecta por un dispositivo rociador fuera de la cámara de expansión. Al entrar en contacto con la temperatura ambiente la espuma colapsa provocando que miles de gotitas de asfalto se desintegren recobrando sus propiedades originales. En este momento el asfalto se adhiere con el agregado fino, formando una pasta que aglutina los agregados gruesos.

Al desintegrarse la burbuja en presencia del agregado, las gotitas de asfalto se aglutinan con las partículas más finas, especialmente con aquellas fracciones menores a 0.075mm (filler), produciendo una mezcla asfalto agregado fino, proceso que se denomina dispersión del asfalto. Esto resulta en una pasta de filler y asfalto que actúa como un mortero entre las partículas gruesas.

La mezcla de materiales con asfalto espumado es una combinación de agregados, betún asfáltico, filler activo (cemento portland o cal), aire y agua, considerando esto, ciertos autores mencionan que el comportamiento de mezclas con AE es similar al de los materiales granulares, pero con una adición de una fuerza cohesiva y una mejora significativa en la reducción de la susceptibilidad a la humedad.

De manera a entender mejor este comportamiento, se esquematiza en la Figura 1 la microestructura interna según la composición espacial dada por fases individuales en la mezcla [1], donde se considera que la misma está formada por:

- Esqueleto de los agregados gruesos
- Un "mastic" compuesto por las partículas finas adheridas al asfalto y el filler activo
- Finos no adheridos que rellenan los huecos del esqueleto formado por los gruesos

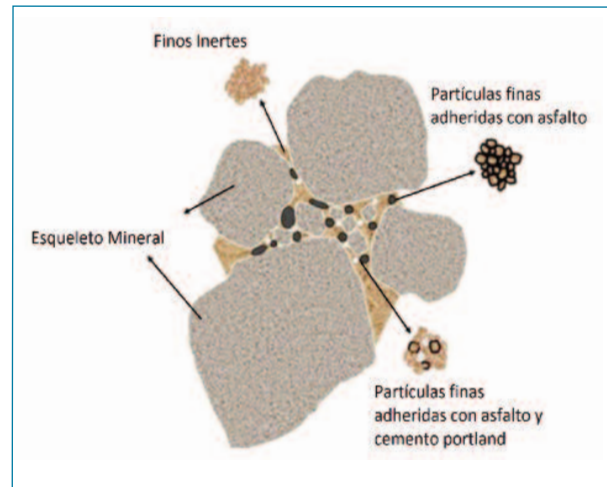


Figura 1. Esquema conceptual de microestructura [1]

Los asfaltos espumados son una técnica que se ha utilizado con éxito en distintos países. El número de kilómetros de pavimentos deteriorados que son rehabilitados anualmente a través del Reciclado con Asfalto Espumado (RAE) se incrementa año a año y es usado en aplicaciones a caminos de bajo volumen de tránsito, así como en carreteras de varios carriles sujetas a tráfico pesado.

2. PROPIEDADES MODULARES DE CORTO MEDIANO Y LARGO PLAZO

Se resumen a continuación algunos de las experiencias internacionales que muestran la variación de la rigidez de estabilizados con asfalto espumado en relación a diferentes variables.

2.1 Proyecto La Madera - Chile

En Chile, se llevó a cabo un monitoreo in situ de la evolución de la rigidez de la capa de RAE utilizando el FWD en el proyecto "La Madera" [2]. El proyecto fue construido entre octubre de 2005 y mayo de 2006, es decir, comenzando durante las primeras semanas de la primavera y terminando a mediados del otoño.

El pavimento existente estaba hecho de 10 cm de una capa de mezcla asfáltica tradicional, 40 cm de bases granulares, sobre un subsuelo arenoso. Veinte centímetros de la estructura del pavimento fueron reciclados y la nueva estructura del pavimento está compuesta por una capa de RAE en un espesor de 15 cm de media con 5 cm de mezcla asfáltica como capa

superficial. La capa de RAE se construyó usando 2,8% de asfalto y 1,0% de cemento portland.

El proyecto "La Madera" se ubica cerca de la ciudad de Concepción (latitud sur 36 ° 46 '). El diseño del proyecto corre a lo largo del río Bio-Bio por casi toda su longitud. El clima en Concepción se considera oceánico y las aguas frías del Océano Pacífico ayudan a mantener temperaturas suaves durante todo el año. La temperatura media es de 17 ° C durante el verano y de 8 ° C durante el invierno. La precipitación anual es de 1.100 mm, que se concentra durante los meses de mayo a octubre (invierno).

Los resultados de rigidez de la capa de RAE y de la subrasante, retrocalculados para cargas de 50 KN, se muestran en la Figura 2. Los datos de FWD se recogieron entre el 24 y el 25 de noviembre de 2006 en todo el proyecto de 33 km de largo, 6 meses después de la finalización del proyecto de construcción. Los valores de módulos indicados son los obtenidos de la huella externa y se normalizaron a 25 °C.

idad tan bajo como 35% de las que tienen un período de curado de 13 meses ubicado cerca del Km 45. Es necesario considerar que una gran parte del proyecto se realizó dentro de un período cálido entre octubre y marzo, por lo tanto las mezclas fueron capaces de perder su humedad y curar. Por el contrario, las mezclas fabricadas durante abril y mayo probablemente no pudieron curarse, manteniendo su humedad constante durante todo el período frío. Esta situación se refleja en los valores obtenidos, donde el módulo elástico en las últimas secciones (cerca del Km 12) es tan bajo como los que normalmente se obtienen para las bases granulares.

2.2 Universidad Técnica Nacional de Atenas

El Laboratorio de Ingeniería de Carreteras de la Universidad Técnica Nacional de Atenas llevó a cabo un experimento de campo en una carretera griega con mucho tráfico con el objetivo de explorar las propiedades del material de capa reciclada.

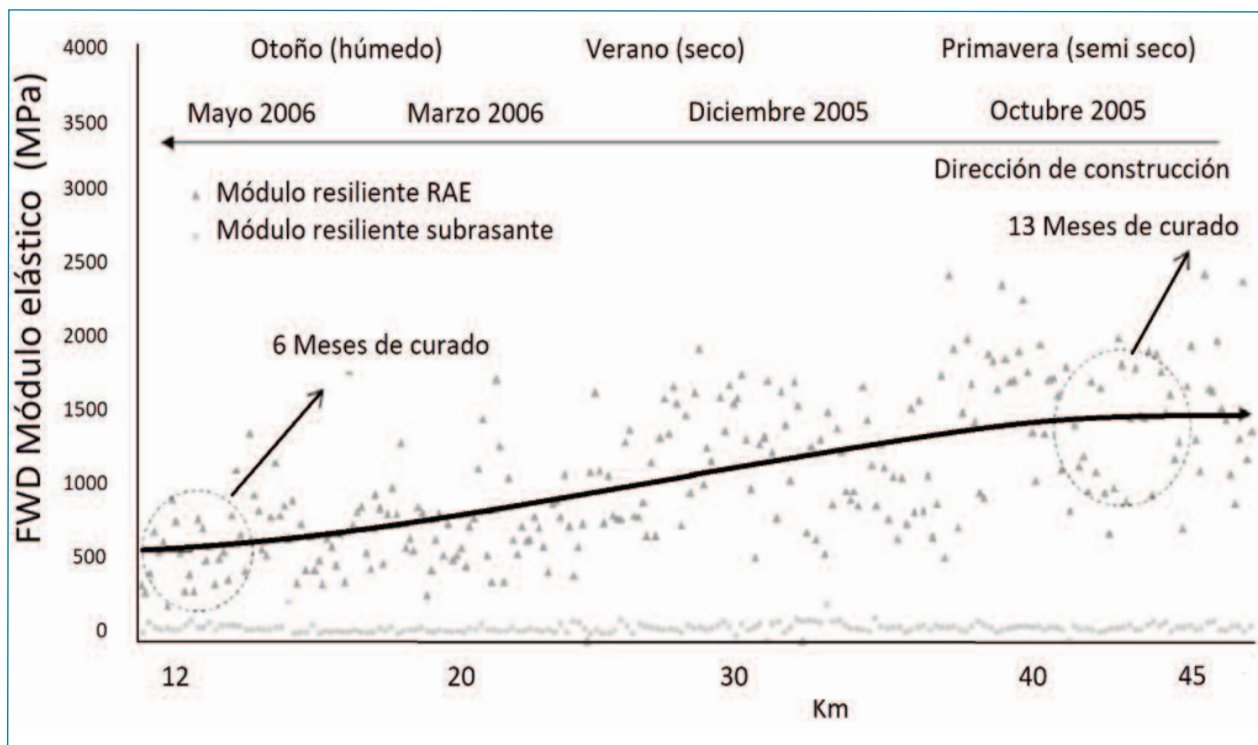


Figura 2. Valores de módulos elásticos retrocalculados [2]

Los resultados del análisis de retrocálculo con FWD revelaron una clara tendencia entre la rigidez y el período de curado. Las secciones ubicadas en Km 12-15, con un período de curado promedio de 6 meses, mostraron un módulo de elasti-

do de asfalto espumado [3]. El objetivo de este estudio fue caracterizar las propiedades de las mezclas durante los primeros años de vida del pavimento reciclado. Se realizó un estudio de investigación exhaustivo que incluyó un seguimiento de dos

años de la rigidez del pavimento mediante el análisis del FWD, así como otras pruebas no destructivas y de laboratorio.

La estructura del pavimento fue: 9 cm de base de concreto asfáltico y campo de rodadura; 25 cm de capa reciclada de asfalto espumado; alrededor de 15-20 cm de capa de material granular con cemento; 15 cm de subbase granular; sobre una subrasante de piedra caliza. La mezcla de asfalto espumado se preparó usando 3,2% de asfalto (penetración 80/100) y 1,0% de cemento portland como relleno activo. Los resultados de la rigidez retrocalculada con FWD de la capa de RAE en cuatro tramos (S1 a S4) se muestran en la Figura 3, usando 50 KN de carga. El gráfico muestra el módulo mínimo, promedio y máximo de la mezcla de RAE, en la huella interior del carril. Si bien existe una gran variabilidad en los resultados, existe una clara tendencia con respecto a la evolución de la rigidez durante el período de análisis. Esta tendencia indicó que la rigidez aumenta sustancialmente durante los primeros 12 meses y luego casi se mantiene constante durante el resto del período, con un ligero aumento en el tiempo.

La rigidez del RAE aumenta gradualmente desde el día de la construcción hasta alcanzar un valor constante después de un período de aproximadamente 12 meses. Las razones de este comportamiento están relacionadas con la pérdida de humedad durante el período de curado, hecho que también ha sido establecido por diversos autores, basado en observacio-

nes de pruebas de laboratorio.

Los estudios realizados en Grecia se llevaron a cabo durante 24 meses. La rigidez de la mezcla de RAE se mantuvo constante a lo largo del período de análisis una vez que alcanzó su valor máximo en el duodécimo mes.

Los elevados valores modulares alcanzados y la falta de caída del módulo, debido a la acción de las cargas, puede inferirse asociada a la gran importancia de la estructura y consecuentemente las bajas solicitaciones en la capa de RAE.

2.3 Ensayo con Simulador de Tránsito Pesado (HVS) - Sudáfrica

Por el contrario, los estudios de investigación llevados a cabo en Sudáfrica [4] indicaron que las capas de AE muestran una disminución gradual en la rigidez debido a las cargas de tráfico. La Figura 4 muestra los resultados de las pruebas aceleradas de pavimento realizadas en pavimentos reciclados utilizando AE y cemento portland como agentes estabilizadores. Los contenidos de asfalto y cemento portland utilizados fueron 1.8% y 2.0% respectivamente. Después de la construcción del pavimento, se aplicó una carga de tráfico de 40 KN utilizando el HVS. Los desplazamientos se evaluaron con deflectómetros de múltiple profundidad (MDD) en diferentes puntos del tramo de prueba. El módulo de cada capa de pavi-

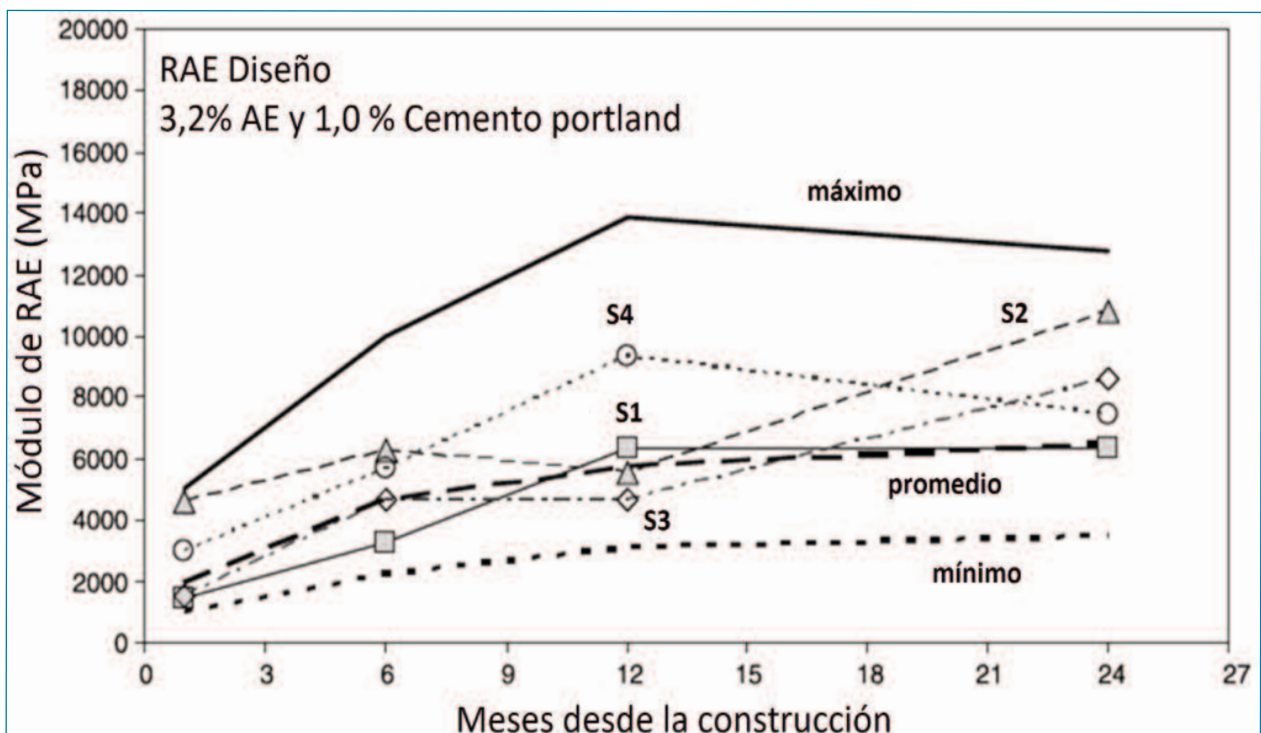


Figura 3. Aumento del módulo elástico retrocalculado para la capa RAE [3]

mento se obtuvo mediante retrocálculo.

Sobre la base de la prueba HVS, se afirma que la degradación del RAE luego del período de curado, tiene dos fases. La primera fase corresponde a una disminución en la rigidez hasta un estado de rigidez constante. La segunda fase está representada por una rigidez constante de la capa de AE, como se muestra en la Figura 4. Durante la prueba, luego de aproximadamente 1.000.000 de ciclos de carga de 40 KN, la carga aplicada aumentó a 80 KN.

Con el aumento de la carga, la rigidez de la capa RAE mostró una tendencia similar a la observada durante los primeros 300,000 ciclos de carga con 40 KN, con una rigidez que disminuye gradualmente hasta que se alcanza un estado de rigidez constante. Los resultados proporcionados por la prueba también indicaron que durante la segunda fase, el material se comporta como un material granular, acumulando deformación permanente debido al ciclo repetitivo de carga.

octubre de 2012 [5]. El estudio analiza los módulos obtenidos por retroanálisis para las diferentes capas de una estructura de pavimento reciclado con AE.

Con el objetivo de estudiar la evolución de la resistencia de la capa reciclada con espuma de asfalto se decidió realizar mediciones con el FWD a 10; 30; 60; 90 y 120 días de construida la base reciclada para estimar el módulo de elasticidad de esta capa en esas fechas. Esto se realizó modelando una estructura de 3 capas (subrasante, base de RAE y carpeta asfáltica) donde se mantuvieron fijos los valores de módulo de elasticidad estimados para la subrasante y la carpeta asfáltica el día de construcción del tramo.

Los valores obtenidos son mostrados en la Figura 5 donde puede observarse que:

- A los 10 días, los valores son comparables a los correspondientes a bases granulares.

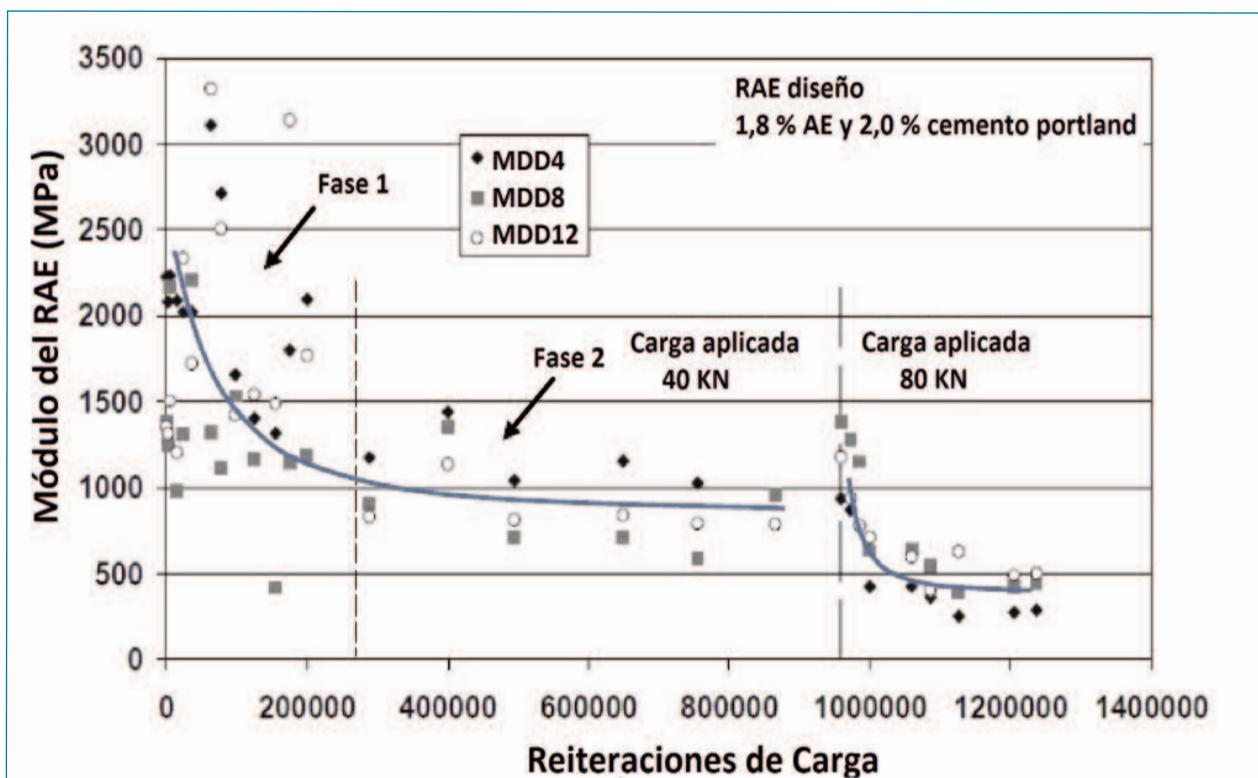


Figura 4. Disminución de la rigidez en la capa AE debido a los ciclos de carga [4]

2.4 Autopista Ayrton Senna - Brasil

Se realizaron estudios en la rehabilitación de la autopista Ayrton Senna en el estado de São Paulo, Brasil; ejecutado en

- Todos los sitios evaluados muestran un crecimiento con la edad dentro del período evaluado de seis meses.
- A seis meses de ejecutada la obra el módulo de elasti-

Estabilización mediante reciclado con Asfalto Espumado en RN3 Uruguay

cidad promedio de la base reciclada se ha incrementado en casi 5 veces respecto al día 10 de construcción.

- El promedio de los módulos entre la fecha 10 días y 30 días; y entre la fecha 30 días y 90 días se incrementa en aproximadamente un 50% en cada caso.

Los resultados permiten concluir que los módulos obtenidos por retroajuste están acordes a los parámetros que deben cumplir estas estructuras. Además, que con el tiempo hay un incremento en la resistencia de la base reciclada; encontrándose en el rango de otros trabajos similares.

ser utilizado por medio de adaptaciones. Estudios, normalmente patrocinados por los departamentos de transporte estatales, se realizaron con el propósito de obtener un valor de coeficiente estructural para la capa reciclada con espuma de asfalto. Los valores varían notablemente entre 0,07 y 014 /cm, requiriéndose de criterio para su adopción.

3.2 Departamento de Transporte o California [7]

Presenta una guía propia para el reciclaje profundo, basado en equi-

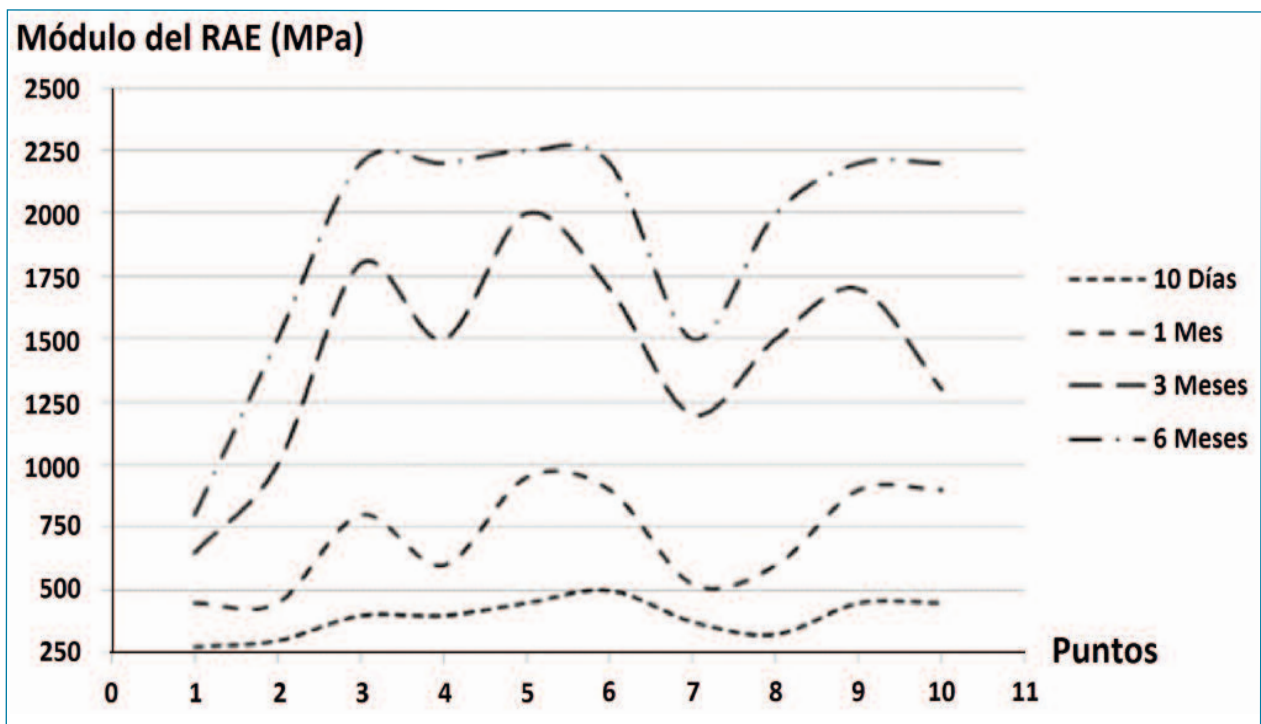


Figura 5. Evolución del módulo del RAE por punto en cada fecha [5]

3. LAS METODOLOGÍAS DEL DISEÑO

Se han desarrollado diversos métodos de diseño de espesor estructural para el diseño de capas con asfalto espumado, la mayoría de ellos basados en supuestos que no necesariamente representan la condición de los pavimentos en los distintos lugares del mundo.

A continuación, se presenta un breve comentario de algunos de los distintos métodos analizados.

3.1 Metodología AASHTO 1993 [6]

No se especifica particularmente para este material, pero puede

valencia estructural de capas y utilización de factores de equivalencia en términos de material granular. El factor adoptado para la capa RAE es igual a 1,4.

3.3 Método Australiano [8]

Austroroads considera el comportamiento del material similar al de las mezclas asfálticas, con falla por fatiga y agrietamiento planteando un análisis mecanicista con consideración de anisotropías. Los pavimentos son monitoreados en el país para validar el método y elaborar un procedimiento definitivo. Algunos organismos de Australia y Nueva Zelanda adaptaron el método australiano antiguo para el reciclaje profundo de sue-

los con asfalto espumado, como los departamentos de transporte de Nueva Zelanda y de Queensland y de la ciudad de Canning, en Australia.

La relación de fatiga asfáltica para la capa con asfalto espumado desarrollada por Austroads relaciona el número admisible de ciclos de carga con las propiedades volumétricas de la mezcla, la rigidez de la mezcla y la deformación específica de tracción en la parte inferior de la capa con AE.

Existiendo adaptaciones locales, la ciudad de Canning [9] desarrolló una relación de fatiga para capas de asfalto espumado usando datos de vigas de flexión preparadas y compactadas en el campo y testeadas en el laboratorio. Se encontró que la relación de fatiga es independiente de la rigidez de las mezclas. El modelo es diferente al de Austroads, pero da como resultado predicciones de vida del pavimento similares a niveles típicos de esfuerzos.

3.4 Austroads, Nueva Zelanda [10]

El procedimiento de diseño de la Agencia de Transporte de Nueva Zelanda (NZTA) sugiere relaciones de fatiga conservadoras. El método recomienda un módulo elástico de 800 MPa (anisotrópico) para el modelado de las propiedades elásticas de la capa de asfalto espumado. El espesor del pavimento se calcula al reducir la tensión de compresión vertical en la parte superior de la subrasante al valor admisible.

3.5 Transport Research Laboratory (TRL), Inglaterra [11]

El TRL611 utiliza una serie de simplificaciones, y las variables de entrada de la capacidad de soporte y el tráfico se clasifican en categorías. Consideran valores altos para el módulo de resiliencia de las bases recicladas con espuma de asfalto, a partir de 1.900 MPa. Supone que las mezclas de asfalto espumado se comportan de manera similar a las mezclas de mezcla de asfalto en caliente siendo la fatiga el modo de falla dominante de estas mezclas. El método se basa en tablas y cuadros que clasifican la subrasante, el tráfico y el tipo de asfalto espumado.

3.6 Asphalt Academy Sudafrica [12]

La Guía Técnica para materiales estabilizados con asfalto

(TG2) publicada en 2002, se desarrolló utilizando ensayos de pavimento acelerado a escala real y trabajos de laboratorio extensos. Considera que las capas estabilizadas con espuma de asfalto pasan por dos fases a lo largo de su vida útil: una fase de resistencia a la fatiga y otra de descenso capacidad estructural, con un comportamiento similar a un material granular; La primera etapa comienza después de la construcción, cuando la capa está intacta, no está dañada y proporciona resistencia a fatiga. Esta fase se denomina "fase de fatiga efectiva" y finaliza cuando, debido a la carga aplicada, la capa reduce su rigidez. La segunda fase se llama 'estado granular equivalente', porque la rigidez de la capa de betún espumado es similar a la de una base granular de buena calidad. Los modos de tensión supuestos de la primera y segunda fase son fatiga y deformación permanente, respectivamente. El TG2 fue actualizado en 2009, tratando las mezclas de AE como un material granular de alta cohesión y resistencia.

3.7 Conclusiones de la bibliografía consultada

Como se ha observado, no hay consenso en relación al comportamiento de las bases recicladas con AE. Existen diferentes enfoques para el problema.

En Australia e Inglaterra, donde normalmente los niveles de espuma son mayores, el material es tratado como una mezcla asfáltica, siendo el modo de falla el de fisuración, mientras que en Sudáfrica el comportamiento es considerado como de material granular y la ruptura se da por las deformaciones permanentes, siendo los contenidos de espuma más pequeños.

Circunstancias que refuerzan la necesidad de realizar experiencias propias que permitan valorar el comportamiento con las condiciones locales de clima, materiales y sollicitaciones. Sin dejar de lado sino partiendo de las experiencias de los que ya han recorrido este camino.

4. EL TRAMO EXPERIMENTAL

Observados los diferentes ejemplos donde la tecnología de asfalto espumado ha sido exitosamente aplicada en América del Sur, incluyendo la autopista de tránsito pesado Ayrton Senna en las afueras de Sao Paulo, Brasil. Diferentes organismos expresaron interés en aplicar esta tecnología en Uruguay. Al mismo tiempo, un tramo de 34.6 Km de Ruta 3 en las proximidades de Trinidad, capital del Departamento de Flores, de-

Estabilización mediante reciclado con Asfalto Espumado en RN3 Uruguay

bía ser rehabilitado y su contrato se encontraba en proceso de adjudicación. Siendo esta obra identificada como una posibilidad para poner a prueba la tecnología de reciclado/estabilización con asfalto en Uruguay.

El diseño de rehabilitación propuesto en el pliego de Licitación indicaba el bacheo de los sectores comprometidos de la carretera existente antes de la aplicación de un recapado de 140mm de espesor de mezcla asfáltica en caliente. La capacidad estructural requerida fue determinada para 8.5 millones de ejes equivalente (ESALs), siendo estos definidos como ejes simples de ruedas duales y carga de 80KN.

Tras una visita al lugar a principios de marzo de 2015, se programaron investigaciones, estudios y ensayos adicionales. Dicha programación incluía la extracción de testigos de mezcla asfáltica y la ejecución de pruebas con penetrómetro dinámico de cono (DCP) cada 500m a lo largo de los 34.6 km del contrato. Muestras del material granular fueron tomadas también cada 500m y sometidas a ensayos de laboratorio. Además, se obtuvieron muestras del material de los 30 cm superiores del pavimento existente para ser utilizadas en los diseños de mezclas estabilizadas con asfalto.

Con el fin de realizar estos diseños de mezcla en Uruguay se siguieron los criterios empleados en Sudáfrica, para lo cual fueron importados equipos de laboratorio especializados. Dicho equipamiento especializado era requerido para elaborar probetas grandes (15 cm de diámetro y 30 cm de altura) utilizando compactación por martillo vibratorio y equipos para ensayo triaxial (cilindro de confinamiento y vejigas, así como una prensa de compresión universal con una capacidad de aplicación de carga por encima de 150 KN).

El objetivo de dar diseños alternativos para la rehabilitación de este tramo de ruta fue proporcionar una estructura de pavimento que:

- Minimice la incorporación de nuevos materiales a la estructura del pavimento, reutilizando el material de las capas superiores del pavimento existente.
- Reduzca la cantidad de material necesario para los arceles, minimizando el aumento de cotas de la superficie final respecto a lo existente.

- Cumpla con el requisito de capacidad estructural para 8.5 millones de ESALs.
- Proporcione una solución más duradera que el diseño original de sobre capa de mezcla asfáltica; y
- Reduzca significativamente los costos globales asociados durante el ciclo de vida para este tramo.

En referencia a la dosificación, se tomaron muestras del material a conformar la capa a estabilizar, una mezcla compuesta por 80% material reciclado del pavimento (RAP) y 20% tosca granítica fue considerada como representativa del material promedio. No obstante, se llevaron a cabo ensayos adicionales tanto para 100% RAP como para 100% tosca granítica.

Realizándose además ensayos con diferentes filleres activos y porcentajes de AE.

Este procedimiento implicó la preparación de tres mezclas por separado con la misma cantidad de AE, con diferentes tipos de filleres activo: una mezcla con 1% de cal hidratada, una con 1% de cemento (en peso del agregado seco) y la otra sin filler activo. Los resultados de los ensayos de Resistencia a la Tracción Indirecta (ITS) para las condiciones seca ITSseco y húmeda ITShum se resumen en la Tabla 1.

La diferencia en los valores de ITS húmedo entre las tres mezclas fue usado para indicar preferencias. Tanto la cal hidratada como el cemento muestran una significativa mejora en comparación a la muestra sin filler activo, con valores para el cemento 50% superiores a los de la cal. En consecuencia, 1% de cemento fue adicionado a las mezclas preparadas para el resto de los ensayos.

Para obtener el tenor óptimo de asfalto a adicionar, se elaboraron cuatro mezclas con diferentes porcentajes de asfalto, todas con 1% de cemento. Estos resultados, mostrados en la Tabla 2, indican que el material excede largamente los requisitos mínimos para clasificar como la mejor calidad del material RAE dentro del criterio Sudafricano (BSM 1) en todo el rango de porcentajes de asfalto analizado. Se observó, en este ensayo, muy poca sensibilidad de los resultados con la cantidad de asfalto adicionado, seleccionándose 2.2% como el contenido de óptimo de asfalto a adicionar.

Tabla 1. Valores ITS (KPa) para mezcla 80%RAP + 20% Tosca con diferentes tipos de filleres

Material	% Asfalto incorporado	1% cal		1% Cemento		Sin filler	
		ITSseco	ITShum	ITSseco	ITShum	ITSseco	ITShum
Mezcla 80% RAP y 20% tosca granítica	2,3	269	183	345	275	199	42

Tabla 2. Valores ITS con distintos % de cemento asfáltico

Ensayos de tracción indirecta para la mezcla 80% RAP más 20% tosca				
Asfalto incorporado %	Filler activo	ITSeco (KPa)	ITShum (KPa)	TSR (%)
2,00	1% cemento	323	267	83
2,25	1% cemento	345	276	80
2,50	1% cemento	323	271	84
2,75	1% cemento	335	261	78
Clasificación BSM-1		>225	>100	No especificado

Se ejecutaron series adicionales de ensayos con una muestra compuesta íntegramente de tosca granítica tomada del horizonte superior los que se mantuvieron superiores a lo requerido para clasificar el material como BSM-1.

5. COMPORTAMIENTO EN SERVICIO

A los efectos de determinar el comportamiento estructural de la capa estabilizada con asfalto espumado se analiza el subtramo comprendido entre la progresivas kilométricas 153,500 y 165,500. Dicho tramo fue construido al comienzo de la obra entre los meses de marzo y mayo de 2016.

A tal fin se realizaron valoraciones de la deformabilidad estructural mediante FWD en cuatro diferentes momentos, previo a la realización de la obra, a los cinco meses en septiembre de 2016, en agosto de 2018 y en diciembre de 2018.

Estas deflexiones fueron utilizadas para obtener el módulo de trabajo de las capas mediante la realización de retroajuste modular utilizando el software BackVide [13].

El tramo luego de realizada la obra quedo conformado como se indica en la Tabla 3.

Tabla 3. Estructura del tramo analizado

Material	Espesor (mm)
Carpeta asfáltica	60
Estabilizado con AE	200
Base Granular	260
Sub Base	310
Subrasante	

5.1 Evolución de los módulos en el tiempo

Se determinaron los módulos de trabajo en base al cuenco medio y característico al ochenta por ciento obteniéndose los valores indicados en la Tabla 4 y 5.

En el proceso de retroajuste modular, el módulo de la Carpeta Asfáltica ejecutada en la mejora, fue asumido como dato y estimado en función de la frecuencia y temperatura en el momento de realizar el ensayo, dado su reducido espesor.

Se observa que los diferentes valores modulares del RAE se encuentran dentro del orden de magnitud esperado.

En base a la bibliografía analizada puede inferirse la existencia de un valor modular máximo, lamentablemente no evaluado, que acontece aproximadamente a los 12 meses como consecuencia de proceso de curado, dependiendo de las condiciones climáticas.

Puede observarse que los valores modulares característicos de la capa estabilizada se encuentran próximos al valor máximo para adoptar en el diseño según el TG2 para la mezcla caracterizada como BSM-1 de 600 MPa.

Pero este método plantea además una relación modular máxima de 3, lo que implicaría un módulo de diseño del orden de 450 MPa planteando la posibilidad que no se haya alcanzado una condición estable y decaiga respecto a su condición actual. Se continuará monitoreando esta obra para poder concluir sobre estos aspectos.

Finalmente, las últimas mediciones realizadas en diciembre de 2018 presentan un menor módulo de la subrasante, el que podría atribuirse a un mayor contenido de humedad dado por las condiciones climáticas del período de medición.

Tabla 4. Módulos en condiciones medias (MPa)

Material	Previo a la Obra	Septiembre 2016 5 meses	Agosto 2018 28 meses	Diciembre 2018 32 meses
Carpeta Asfáltica	340	323	267	83
Estabilizado con AE	---	345	276	80
Base Granular	153	323	271	84
Sub Base	102	335	261	78
Subrasante	38	335	261	78

Tabla 5. Módulos en condiciones características (MPa)

Material	Previo a la Obra	Septiembre 2016 5 meses	Agosto 2018 28 meses	Diciembre 2018 32 meses
Carpeta Asfáltica	1% cemento	323	267	83
Estabilizado con AE	1% cemento	345	276	80
Base Granular	1% cemento	323	271	84
Sub Base	1% cemento	335	261	78
Subrasante	1% cemento	335	261	78

5.2 Comportamiento tenso dependiente

En oportunidad de las mediciones efectuadas en agosto de 2018 se realizó un estudio de linealidad aplicando con el FWD tres niveles de cargas objetivo 20, 40 y 65 kN en un sector limitado del tramo.

El análisis consistió en normalizar todos los puntos y sensores a la carga media lograda en cada nivel para minimizar las distorsiones provocadas por los efectos de no linealidad. Los módulos medios obtenidos se indican en la Tabla 6.

El módulo obtenido para el RAE presenta un cierto comporta-

miento tensional, evidenciando como material granular (friccional) un mayor módulo para las mayores cargas aplicadas, que consecuentemente provocan mayores valores de confinamientos.

Los Módulos obtenidos para la Subrasante presentan, con un leve grado, el comportamiento esperado respecto a los niveles de carga. Evidenciando la tendencia habitual de los suelos finos cohesivos, mayores valores para las menores cargas aplicadas, que consecuentemente provocan menores esfuerzos de corte; esta tendencia se muestra para la menor carga aplicada.

Tabla 6. Módulos medios para diferentes cargas aplicadas (MPa)

Material	22 kN	42 kN	68 kN
Carpeta asfáltica	3000	3000	3000
Estabilizado con AE	1481	1545	1643
Base Granular	239	210	208
Sub Base	160	140	139
Subrasante	59	51	51

5.3 Estimación de la Vida Útil

Continuando con el uso del programa BackViDe, se analiza el tramo en estudio, con un tránsito inicial de 0,75 millones de ejes equivalentes y una tasa de crecimiento del 3%.

Se aplican los siguientes criterios

- Se adoptan los módulos de los materiales no ligados correspondientes a la auscultación característica de agosto de 2018.
- Se realiza un análisis de sensibilidad respecto al módulo del RAE entre 400 y 650 MPa.
- El criterio de falla del AE es asumido como el de una base granular.
- Se considera la carpeta asfáltica con un 12% de asfalto en volumen y un módulo de 3000 MPa
- Se considera falla un 30% de fisuras totales o 10 mm de ahuellamiento

Resultando la siguiente tendencia indicada en la Figura 6.

El análisis brinda una vida de la mejora superior a 10 años a partir de un módulo efectivo de 450 MPa. Según los modelos del programa BackViDe para módulos del RAE inferiores a 470 MPa la falla sería inicialmente por fisuración de la carpeta asfáltica y para valores modulares superiores por ahuellamiento de la subrasante.

En la actualidad el estado de la calzada es muy bueno, con una adecuada rugosidad y sin presencia de ahuellamientos, sólo presenta muy puntualmente fisuras longitudinales finas (menos de 1mm) coincidentes con la segunda pasada de la recicladora en el proceso de generación de la base estabilizada. Estas fisuras se deben al procedimiento constructivo del reciclado y se pueden controlar si se respetan los tiempos de trabajo en el ancho de faja completo y la dosificación de cemento portland en la zona de solape.

Además, en dos zonas puntuales se observó una falla de adherencia de la capa de 4 cm de mezcla asfáltica generada por una falla en el riego de adherencia. Debajo de esos 4cm la capa de base estabilizada con AE se encontraba en buenas condiciones.

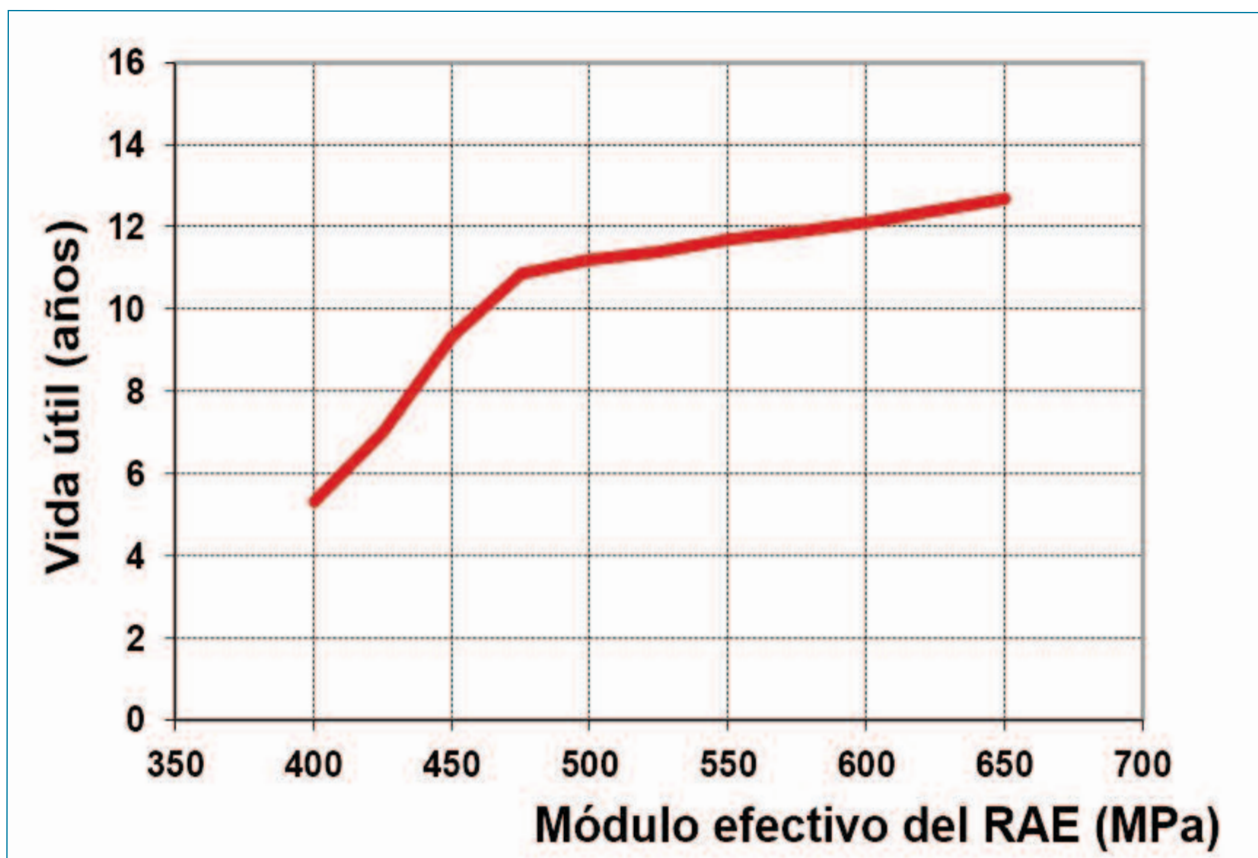


Figura 6. Vida útil estimada en función del módulo efectivo de la capa de RAE

6. COMENTARIOS

Realizado la revisión bibliográfica de artículos y publicaciones relacionados con el uso de la tecnología de reciclado in situ con asfalto espumado, se concluye que es una técnica de rehabilitación viable que pudiera tener una ventana de aplicación en la red vial de Uruguay.

La misma brinda oportunidades de rapidez de ejecución, ventajas desde el punto de vista ambiental y ventajas económicas comparadas relativamente con otras técnicas de rehabilitación de pavimentos.

Realizado el análisis al proyecto, al procedimiento constructivo, a los ensayos ejecutados durante la construcción de la obra y al seguimiento posterior del tramo en servicio. La performance fue coincidente con la planteada en la bibliografía.

Como lección aprendida de las obras realizadas se puede establecer que las bajas temperaturas afectan notoriamente la ejecución de esta técnica por lo que se deberán planificar los trabajos para evitar los meses de invierno (temperatura recomendada mayor a los 5° C, temperatura sugerida mayor a 10°).

Dentro de las ventajas más importantes evidenciadas al utilizar un reciclado en frío con asfalto espumado se encuentran: reutilización del material existente en ruta, impidiendo la explotación de nuevos áridos, lograr una alta calidad de las capas estructurales recicladas, menores tiempos de construcción los cuales además también disminuyen los costos y generan un beneficio a los usuarios del camino, seguridad pues el tren de reciclado se puede acomodar en el ancho de una senda, entre otras.

Finalmente se propicia la necesidad de realizar experiencias propias que permitan valorar el comportamiento con las condiciones locales de clima, materiales y solicitaciones. Sin dejar de lado sino partiendo de las experiencias de los que ya han recorrido este camino.

7. REFERENCIAS

- [1] Paniagua, F., Halles, F., Thenoux, G., González, A. 2013. Evaluación de la rigidez a largo plazo de mezclas estabilizadas con asfalto espumado y cemento XVII Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto
- [2] Halles, F. 2013. Stiffness evolution mechanism of recycled mixes with foamed bitumen and cement, Repositorio Pontificia Universidad Católica de Chile
- [3] Loizos, A. 2007. In-Situ Characterization of Foamed Bitumen Treated Layer Mixes for Heavy-Duty Pavements. In International Journal of Pavement Engineering, Vol. 8, N° 2, 123-135.
- [4] Long, F. 2001. The Development of Structural Design Models for Foamed Bitumen Treated Pavement Layers. Contract Report CR-2001/76, Gauteng – CSIR, South Africa.
- [5] Martinez, R., Lima, C., Bonfim, V. 2013. Retroanálisis para estimar los módulos de las capas de un pavimento reciclado con espuma de asfalto. XVII Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto
- [6] AASHTO. Guide for Design of Pavement Structures AASHTO. 1993, American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [7] CALTRANS 2008. Highway design manual. California Department of Transportation.
- [8] AUSTRROADS 2011. Technical Report: Review of Foamed Bitumen Stabilisation Mix Design Methods. Austroads Ltd.
- [9] Leek, C. 2010. Review of the performance of in-situ foamed bitumen stabilised pavements in the City of Canning. City of Canning.
- [10] Transit New Zealand. 2007. Pavement design - A guide to the structural design of road pavements (Austroads, 2004). Wellington, Nova Zelândia: Transit New Zealand.
- [11] Merrill, D., Numm M., Carswell I. 2004. A guide to the use and specification of cold recycled materials for the maintenance of road pavements TRL 611 Transport Research Laboratory
- [12] Asphalt Academy 2009. Technical guideline: bitumen stabilised materials, TG2, Asphalt Academy, CSIR Built Environment, Pretoria, South Africa
- [13] Giovanon, O., Pagola, M. 2013. Modelo mecanicista empírico para análisis de pavimentos flexibles desarrollado en Argentina. XVII Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto