

PAVIMENTOS DE BLOQUES ASFÁLTICOS PARA VÍAS DE BAJO VOLUMEN DE TRÁNSITO

Carlos Marín¹, Guillermo Thenoux², David Saldaña³, Robinson Lucero⁴

¹ Pontificia Universidad Católica de Chile, crmarin@uc.cl

² Pontificia Universidad Católica de Chile, gthenoux@ing.puc.cl

³ APSA Ltda, dsaldana@apsa.cl

⁴ APSA Ltda, rlucero@apsa.cl

Resumen

La capa de rodado de un pavimento articulado tradicionalmente está compuesta por bloques de hormigón denominados “Adoquines”. Son diversas las aplicaciones de este tipo de pavimentos: parques o plazas, estacionamientos, zonas para el manejo de contenedores y vías de bajos volúmenes de tránsito, entre otros. Este trabajo presenta los resultados de investigación sobre una alternativa de pavimento articulado cuya capa de rodado se compone de bloques elaborados con mezclas asfálticas recicladas en caliente; es decir, con la incorporación de material asfáltico recuperado - RAP (Reclaimed Asphalt Pavement). Estos bloques son denominados “AdoRap”. El trabajo presenta el procedimiento de investigación para determinar la capacidad estructural de un pavimento construido con AdoRap y muestra las recomendaciones constructivas preliminares. El estudio se basa principalmente en un trabajo de terreno donde se fabricaron los bloques in situ, en la misma área de construcción de la sección experimental. Se llevaron a cabo ensayos deflectométricos mediante un deflectómetro de impacto – FWD (Falling Weight Deflectometer) utilizando diferentes configuraciones constructivas (patrón de colocación y tamaño del bloque) aplicando distintos niveles de carga de 30, 40 y 50 KN. El programa computacional de retro-cálculo EVERCALC se utilizó para determinar el aporte estructural de los bloques AdoRap. Se encontró que el módulo elástico equivalente de la capa de bloques asfálticos oscila entre 300 Mpa y 800 MPa para un 95% de confianza. Finalmente, se desarrollaron gráficos para ser aplicados en diseños de pavimentos articulados con bloques asfálticos para vías de bajo volumen de tránsito, considerando la deformación vertical en la subrasante como criterio de diseño para el espesor de la estructura

Palabras clave: Pavimento Articulado, AdoRap, RAP, Bloques Asfálticos

1 Introducción

En los últimos años, el empleo de mezclas asfálticas con la incorporación de material asfáltico recuperado (RAP – Reclaimed Asphalt Pavement) se ha estado impulsando como alternativa de pavimentación debido a sus ventajas y aporte a una infraestructura vial más sustentable. Las razones principales son el beneficio económico a través de la reducción de costos de construcción y de disposición en vertederos, los beneficios medioambientales a través de la reducción de la explotación de nuevos materiales y la reducción de energía del proceso mediante la técnica del reciclado debido a la reutilización del asfalto residual y de los agregados del material RAP, reduciendo la cantidad requerida de nuevo asfalto y de agregados vírgenes para la fabricación de la mezcla [1]. Debido a que una buena parte de las labores de rehabilitación de los pavimentos se ha enfocado en el reciclado de sus materiales específicamente en el fresado de las capas puramente asfálticas, este material RAP ha ido en aumento y continua creciendo por lo que se hace necesario su reutilización.

Por otro lado, la literatura reporta que casi todos los caminos sin pavimentar (13 millones de km) y un estimado del 85% de los caminos pavimentados (17 millones de km) están clasificados como “Caminos de Bajo Volumen de Tránsito (CBVT)” [2]. Un CBVT es considerado como un camino que tiene un relativo bajo uso con un Tránsito Medio Diario Anual (TMDA) de 400 vehículos por día (vpd) o menos y con velocidades de diseño bajas, generalmente menos de 80 Km/h y en muchas ocasiones con prevalencia de cargas de gran magnitud. Muchos de estos caminos se encuentran sin pavimentar o cuentan con capas de rodadura de calidades muy variables, lo cual trae consigo problemáticas que los hace particularmente vulnerables a las condiciones del suelo y el drenaje del agua superficial que pueden degradar rápidamente su funcionalidad, causar daños estructurales y generar impactos adversos sobre el medio ambiente local, la calidad del agua y la vida acuática. Elegir un tipo de superficie para esta clase de caminos es un desafío y advierte un análisis profundo que balancee los costos asociados con los requerimientos funcionales y estructurales. Tradicionalmente las superficies de rodado más utilizadas en los CBVT están compuestas por capas asfálticas y de grava pero en muchos casos se hace difícil justificar económicamente la pavimentación con capas asfálticas y la alternativa con grava presenta problemas en la gestión del mantenimiento y baja calidad de la superficie de rodado.

Este trabajo presenta los resultados de una investigación de un tramo de prueba experimental de un pavimento articulado con una superficie construida a base de bloques asfálticos con la incorporación de material RAP elaborados de manera no convencional con dos objetivos principales: promover el uso del RAP y ser aplicado en caminos CBVT como capa de rodadura de un pavimento articulado. El estudio se compone de los siguientes aspectos:

- Procedimiento constructivo para la obtención de los bloques asfálticos.
- Una evaluación del comportamiento estructural de un tramo experimental de un pavimento articulado construido con bloques de mezcla asfáltica reciclada por medio de un deflectómetro de impacto FWD – Falling Weight Deflectometer).
- Evaluación del módulo elástico equivalente de la capa de bloques asfálticos.
- Desarrollo de cartas de diseño para pavimentos articulados de bloques asfálticos.

2 Fundamento de la alternativa de pavimentación

La alternativa promueve la reducción y/o aprovechamiento de materiales con posibilidad de reutilización y/o reciclaje como lo es el RAP, el cual además de las ventajas ya mencionadas permitiría la optimización de la gestión de una planta de asfalto fija mediante el manejo de los tiempos muertos de trabajo. Por otro lado, al proponer un bloque prefabricado se brinda la posibilidad de tener un control industrial de su elaboración y su colocación en terreno se hace simple y sencilla, sin requerimientos de maquinaria especializada y haciendo uso de mano de obra intensiva. Además, al tratarse de una alternativa de pavimentación tipo articulada se tiene un control de las patologías de deterioro más comunes de los pavimentos asfálticos como la fatiga, el ahuellamiento y la fisuración por baja temperatura lo que permite no emplear los criterios tradicionales de diseño de mezclas y proponer otros más simples y ajustados al concepto de desempeño estructural tanto de la mezcla como del pavimento articulado.

3 Materiales y métodos

3.1 Descripción metodológica de la investigación

Para llevar a cabo este trabajo de investigación se desarrollaron las siguientes actividades:

- Construcción de la estructura base de pavimento flexible.
- Corte de la capa de rodadura para obtener los bloques de asfalto.
- Retiro y colocación de los bloques para armar la superficie articulada.
- Mediciones deflectométricas sobre el pavimento articulado de bloques asfálticos.

3.2 Construcción tramo de prueba

El tramo de prueba fue construido con la cooperación de la empresa Quilín Asfaltos y se localizó en un área propiedad de la misma cerca de la Ruta 68 vía a la población de Noviciado (Chile). Este tramo experimental contó con un ancho de 4 metros y una longitud de 20 metros. El ancho fue dividido en dos pistas o carriles, cada uno con 2 metros asignándoseles para su construcción un tamaño de bloque diferente y la longitud fue seccionada en tres sub-tramos con una capa de rodadura con contenidos de RAP diferentes (ver Tabla 1). La estructura de pavimento se compone de una capa de sub-rasante con un CBR aproximado del 7%, una capa de base granular de 20 cm de espesor y una capa asfáltica con un espesor de 5 cm.

Tabla 1. Sub-tramos de construcción con distintos contenidos de RAP

Sub-tramo	Abcisas	Longitud (m)	Contenido de RAP en la mezcla (%)
1	K0+000 -K0+004	4	0
2	K0+004-K0+013	9	15
3	K0+013-K0+020	7	25

Se eligió el 25% RAP como máxima cantidad para incorporación en la mezcla de acuerdo a la capacidad propia de producción de la planta

3.2.1 Materiales

El RAP utilizado para la elaboración de las mezclas asfálticas recicladas fue seleccionado de la planta de producción de mezclas “Quilín Asfaltos” con sede en la ciudad de Santiago de Chile. Este material es proveniente de diversas labores de fresado de capas asfálticas deterioradas dentro del plan de mantenimiento de la red vial de la ciudad y de acuerdo con extracciones de asfalto realizadas en el laboratorio se determinó que contenía un 5.5% de asfalto residual [3]. Los agregados vírgenes fueron donados por la misma empresa al igual que el asfalto tipo CA-24.

3.2.2 Fabricación de las mezclas asfálticas recicladas para el tramo de prueba

Se fabricaron mezclas asfálticas recicladas con tres diferentes contenidos de RAP: 0%, 15% y 25%. Se empleó la granulometría semi-densa tipo IV-A-12 con un tamaño máximo nominal de 19 mm utilizada en Chile como capa de rodadura en la mayoría de proyectos interurbanos [4]. El diseño de las mezclas en laboratorio empleando el método Marshall arrojó un contenido óptimo de asfalto promedio de 5.5%, el cual se conservó para los tres tipos de mezclas dejando constante esta variable de estudio y permitir la comparación entre ellas. La Figura 1 muestra la parte inicial del proceso de fabricación en planta de las mezclas recicladas.

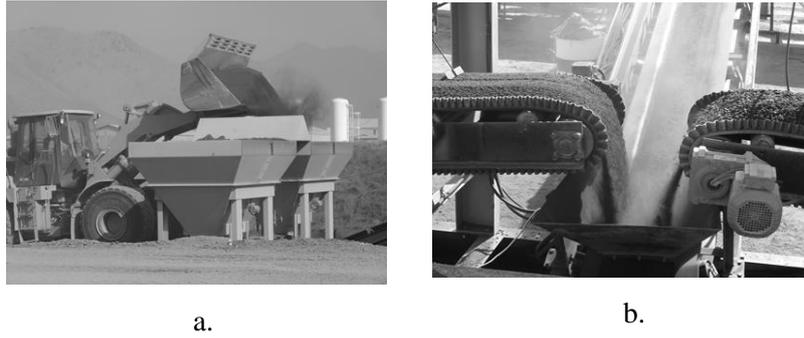


Figura 1 Fabricación de mezclas asfálticas recicladas. a. Alimentación de las tolvas para RAP
b. Dosificación de las fracciones de RAP fino y gruesa

3.2.3 Construcción del pavimento flexible

Las capas del pavimento fueron construidas de la misma forma que un pavimento asfáltico tradicional con una estructura compuesta por la sub-rasante, una capa de base granular de 20 cm de espesor y una capa asfáltica de 5 cm de espesor. El procedimiento de terreno se puede observar en la Figura 2.

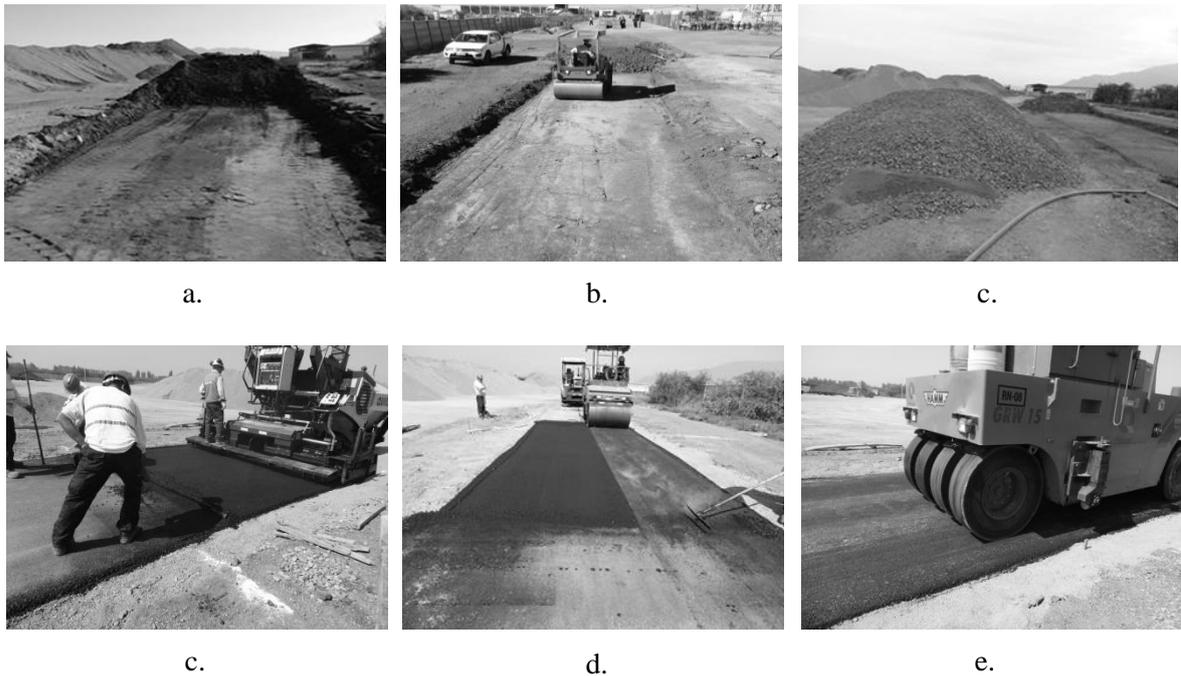


Figura 2 Construcción tramo de prueba. a. Escarpado del terreno b. Compactación de la sub-rasante; c. Material de base granular; c. Extensión de la mezcla asfáltica con terminadora; d. Compactación con rodillo liso; e. Compactación con neumáticos

3.2.4 Fabricación del bloque y del pavimento articulado

Las dimensiones del bloque se determinaron teniendo en cuenta los aspectos constructivo y estructural del pavimento articulado definiendo tanto la condición de constructabilidad (peso y rendimiento de construcción) como la capacidad estructural del bloque (tamaño de la impronta del neumático sobre el bloque y resistencia a la flexo-tracción). Se planteó inicialmente que el tamaño del bloque coincidiera lo máximo posible con el tamaño de la impronta del neumático sobre el pavimento por lo que se calcularon dos tipos de impronta, una circular y una combinada (su geometría la componen un rectángulo y dos semi-círculos en sus extremos) quedando definidas para una condición de carga de 20 KN (carga de un eje estándar simple de rueda doble de 80 KN) y una presión de inflado que oscila entre los 520 y 690 KPa, obteniéndose dos tamaños representativos para el bloque: uno cuadrado de 20 cm x 20 cm y uno rectangular de 25 cm x 15 cm.

Para la construcción de la estructura articulada se cortó la capa de asfalto mediante una cortadora de pavimento en los tamaños antes definidos. Posteriormente se retiraron los bloques ya conformados y se acomodaron al costado del tramo de prueba mientras se extendió una capa de arena con un espesor entre 1 a 2 cm con el propósito de servir de apoyo y base nivelante de los bloques. Finalmente, los bloques de asfalto retirados se colocaron conformando la capa articulada empleando los mismos procedimientos de construcción de un pavimento con bloques de hormigón o adoquines.

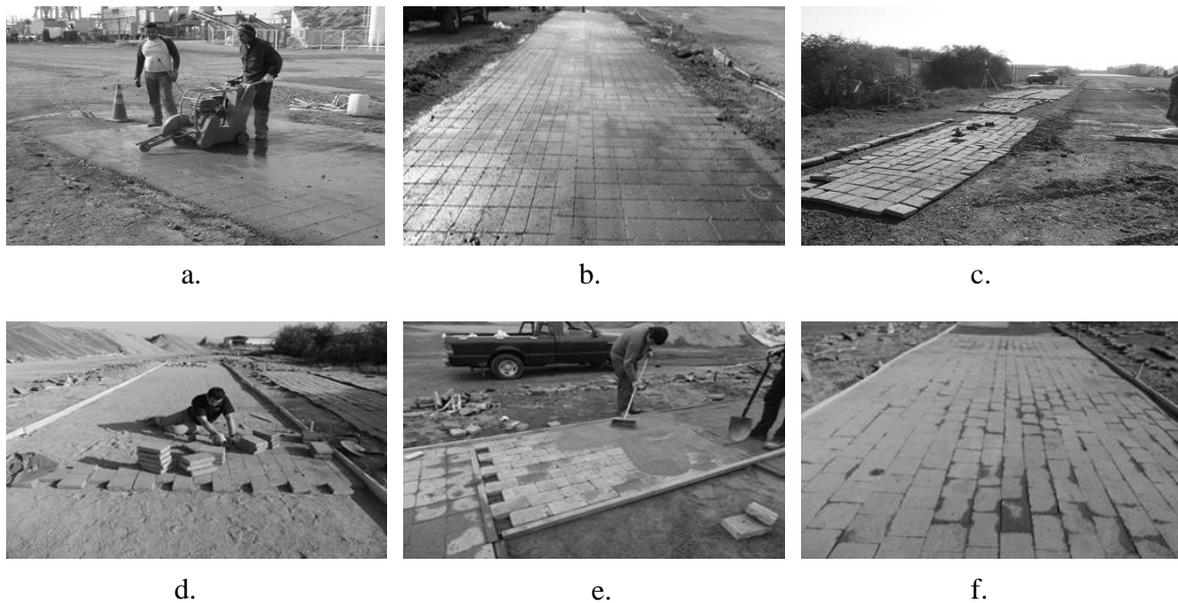


Figura 3 Construcción pavimento articulado con bloques de asfalto. a. Cortado de la superficie de asfalto con cortadora; b. Capa asfáltica cortada; c. Extracción de bloques asfálticos; d. Armado de la capa de bloques; e. Relleno de juntas con arena; f. Vista general de la capa de bloques terminada

La conformación de la capa articulada se configuró mediante tramos construidos en dos patrones de colocación tanto para los bloques rectangulares como los cuadrados y los tres contenidos de RAP. La Figura 4 muestra la configuración de la capa de rodado del pavimento articulado con bloques de asfalto.

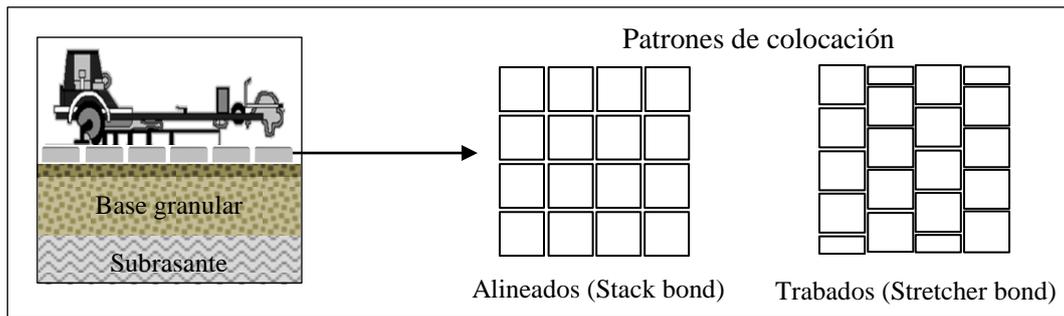


Figura 4 Patrón de colocación de los bloques en el pavimento articulado

3.3 Evaluación estructural

La evaluación deflectométrica la realizó la empresa APSA Ltda mediante su deflectómetro de impacto (FWD) Dynatest 8002-152. Los datos fueron tomados mediante geófonos localizados a una distancia radial de 0, 200, 300, 450, 600, 750, 900 y 1500 mm y aplicaciones de carga con magnitudes de 30, 40 y 50 KN. La variable inicial de interés es la deflexión medida directamente debajo del plato de carga llamada D_0 que es la máxima deflexión. Posteriormente se pueden estimar los módulos de las distintas capas de la estructura mediante la metodología del retro-cálculo.

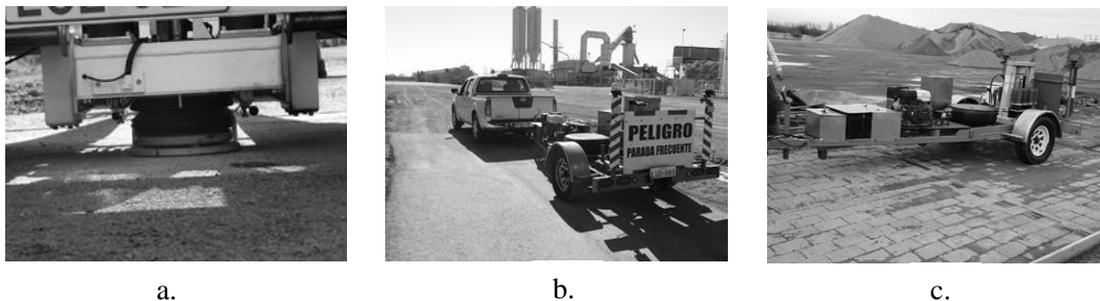


Figura 5 Deflectometría de impacto sobre tipo de capa. a. Base granular; b. Capa asfáltica continua; c. Capa de bloques

4 Resultados y discusión

4.1 Evaluación deflectométrica

La Figura 6 presenta los cuencos de deflexión para los tramos construidos con bloques asfálticos con distintos contenidos de RAP, dos tamaños de bloque y dos patrones de colocación. Se observa que los cuencos de deflexión tienen una tendencia y forma similar indicando que los tramos de pavimento distribuyen las cargas de igual manera independiente del patrón de colocación y del tamaño del bloque para las variables estudiadas en esta investigación. También se puede observar que con el aumento de la distancia de los sensores las deflexiones medidas

convergen a un mismo valor. En este trabajo se encontró que esta distancia es de 400 mm donde aparece un punto de inflexión marcado, lo que significa que la carga impuesta es prácticamente soportada por el bloque en el cual se aplica y por su vecino inmediato dadas las dimensiones estudiadas. Sobre esta capa se continúan haciendo mediciones ya que al momento de realizar la deflectometría de impacto la estructura se encontraba húmeda debido a constantes lluvias ocurridas en los días anteriores pudiendo debilitar la sub-rasante o eliminar la arena de las juntas entre bloques disminuyendo la transferencia de carga.

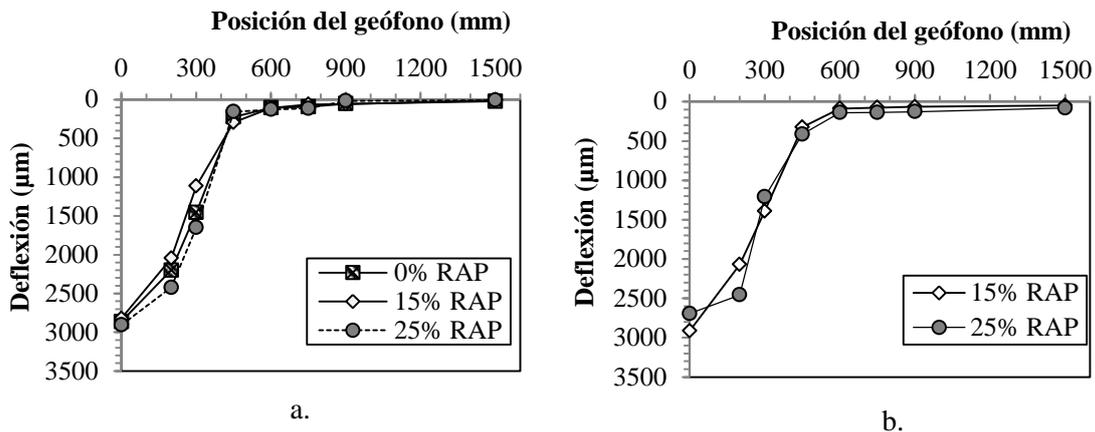


Figura 6 Deflexiones promedio normalizadas para una carga de 40 KN. a. Bloques rectangulares con patrón de colocación trabado (Stretcher bond) b. Bloques cuadrados con patrón de colocación alineado (Stack bond)

4.2 Valores de módulos retro-calculados

El pavimento articulado con bloques de asfalto se trató como un sistema de tres capas en el cual los bloques conforman la capa superior, la base granular y la sub-rasante forman la segunda y tercera capa respectivamente. Los datos de deflexiones obtenidos de terreno fueron utilizados para retro-calcular los módulos de dichas capas del pavimento. En el presente estudio se utilizó el programa de computador EVERCAL el cual está basado en un análisis de capas elásticas y permite determinar el módulo elástico de las capas del pavimento mediante iteraciones sucesivas ajustando las deflexiones medidas en terreno con las deflexiones calculadas dentro de un rango de error especificado [5]. Las propiedades de los materiales empleados y los módulos retro-calculados empleando el programa de computador antes mencionado se pueden ver en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades de los materiales del pavimento

Capa	Espesor (mm)	Módulo retro-calculado (MPa)	Relación de Poisson
Bloques de asfalto	50	550	0.35
Base granular	200	110	0.40
Sub-rasante	-	61	0.45

El valor del módulo propuesto para la capa de bloques asfálticos corresponde a un promedio representativo para todos los tramos estudiados incluyendo los dos patrones de colocación de los bloques, los dos tamaños del bloque y los tres contenidos de RAP de la mezcla asfáltica del bloque. Esto se pudo establecer así dado que los valores de los módulos retro-calculados para los distintos tramos analizados fueron similares en magnitud. La Figura 7 representa los valores promedios del módulo de la capa de bloques asfálticos y sus respectivas barras de error típico para un 95% de confiabilidad para los tramos con contenidos de RAP diferente. Estos valores incluyen los dos patrones de colocación de los bloques y los dos tamaños de bloque empleados.

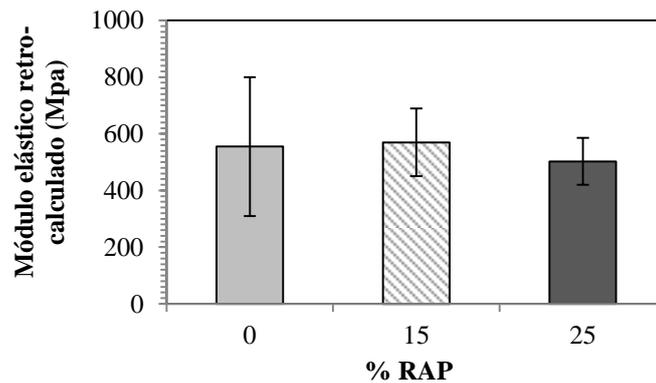


Figura 7 Módulos elásticos retro-calculados para la capa de bloques asfálticos según su contenido de RAP

La magnitud de la barra de error para la capa de bloques con una mezcla patrón con 0% RAP se debe a que el resultado reportado incluye solo dos medidas, una para el tramo con bloques rectangulares y otra para el tramo con bloques cuadrados.

5 Propuesta de diseño estructural

Para la elaboración de la propuesta de diseño de pavimentos articulados con bloques asfálticos se asumió que su comportamiento estructural se asemeja al de un pavimento flexible tradicional en donde los esfuerzos ocasionados por la imposición de la carga del tránsito se disipan a través de la profundidad de las capas y responden de manera elástica.

5.1 Módulos elásticos de las capas del pavimento

5.1.1 Módulo de la sub-rasante

La resistencia de la sub-rasante se puede caracterizar en términos del valor de diseño de CBR. Sin embargo, dado que las soluciones propuestas en este trabajo se construyeron empleando el método mecanicista de multicapas, el cual emplea la propiedad del Módulo Resiliente (M_R) como parámetro de diseño de la sub-rasante, se emplean las ecuaciones 1 y 2 para la estimación de dicha propiedad con base en el valor del CBR:

$$M_R = 17.6 \times CBR^{0.64} \text{ (MPa)} \quad 2 < CBR < 12 \quad (1)$$

$$M_R = 22.1 \times CBR^{0.55} \text{ (MPa)} \quad 12 < CBR < 80 \quad (2)$$

5.1.2 Módulo de la base granular

Se adoptó la ecuación 3 propuesta por la SHELL [6] para asignar los módulos a la capa de base granular.

$$E_{bg} = 0.2 \times h_{bg}^{0.45} \times E_{sr} \text{ (MPa)} \quad (3)$$

donde E_{bg} es el módulo elástico de la capa de base granular (MPa), E_{sr} el módulo elástico de la capa de sub-rasante (MPa) y H_{bg} el espesor de la capa de base granular (mm).

5.1.3 Capa de bloques de asfalto

Para determinar el módulo elástico de la capa de bloques asfálticos se tomaron mediciones con un deflectómetro de impacto (FWD) y mediante retro-cálculos se obtuvieron valores que oscilan entre 300 MPa y 800 MPa para un 95% de confianza. Para la elaboración de las cartas de diseño se recomendó un valor de 550 MPa.

5.2 Tránsito de diseño

El tránsito de diseño corresponde al número de Ejes Equivalentes de Carga Acumulados (EEA) para el período de diseño para un eje estándar de 80 KN (8.16 tn). Se consideran sólo los vehículos pesados para estimar el número de solicitaciones que afectarán al camino durante su vida de servicio ya que se establece que los vehículos livianos no aportan significativamente al daño estructural del pavimento. Este trabajo propone diseños estructurales hasta 1×10^6 ejes equivalentes de carga, utilizando la configuración de la carga de diseño estándar de 40 KN para un eje simple de rueda doble (basado en la carga legal por eje de 80 KN) con una separación centro a centro entre neumáticos de 350 mm y una presión de contacto uniforme de 520 kPa.

5.3 Criterios de diseño

El modo de falla para el material seleccionado y la sub-rasante es la deformación permanente de estas capas, originando la deformación de la capa de rodadura. El parámetro crítico para estos materiales es la deformación vertical ε_v sobre la parte superior de la sub-rasante. Se proponen para esta guía las funciones de transferencia propuestos por el método sudafricano de diseño de pavimentos para una condición terminal de 20 mm de ahuellamiento debido a la deformación del material seleccionado o el suelo de sub-rasante.

La Ecuación 4 muestra la forma general de la función de transferencia para el material seleccionado y el suelo de sub-rasante con los coeficientes de regresión para dos niveles de servicio/categorías del camino: C y D, los cuales emplean valores de confiabilidad en el diseño de 80 y 50% respectivamente.

$$N = 10^{(A-10 \times \text{Log} \epsilon_v)} \quad (4)$$

donde N es el número de ejes equivalentes admisibles, A es un valor que depende de la confiabilidad del diseño y ϵ_v la deformación vertical en la superficie de la sub-rasante.

Tabla 3. Coeficientes de regresión para la función de transferencia general de deformación de la sub-rasante

Nivel de servicio/Categoría del camino	A (Coeficiente de regresión)
C	36.47
D	36.70

5.4 Cartas gráficas de diseño

Se analizaron una serie de combinaciones de secciones de pavimento articulado con bloques de asfalto (variando los espesores de la capa de base granular) utilizando el programa EverStressFE, el cual permite analizar los pavimentos flexibles mediante la herramienta de los elementos finitos en 3D. Este programa fue elaborado por la Universidad de Maine y se puede conseguir de forma gratuita. Estos cálculos fueron complementados aplicando el método numérico de las diferencias divididas de Newton para determinar los polinomios que representan las curvas en todos los rangos estudiados.

Las modelaciones se efectuaron conservando constante el espesor de los bloques de asfalto y variando el espesor de la base granular. Se calculó la deformación vertical de cada modelo cuidando que no superara a la deformación admisible dado por la ecuación 4. Este trabajo fue iterativo para cada nivel de servicio o categoría del camino. La Figura 8 y la Figura 9 muestran las cartas de diseño para pavimentos de bloques asfálticos donde se consideró el ahuellamiento como criterio de falla de la estructura.

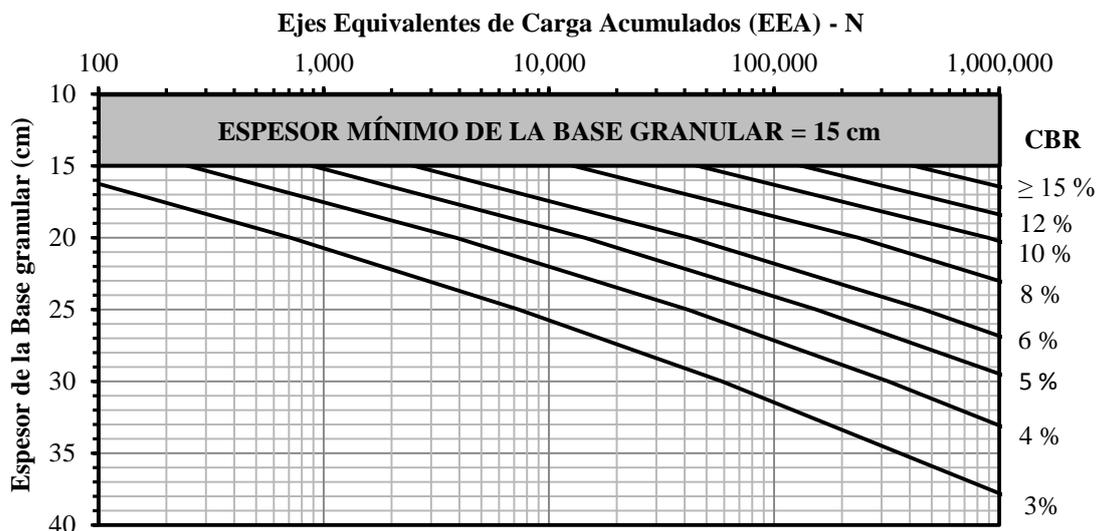


Figura 8 Carta de diseño para nivel de servicio/categoría del camino "C" (Confiabilidad de diseño 80%)

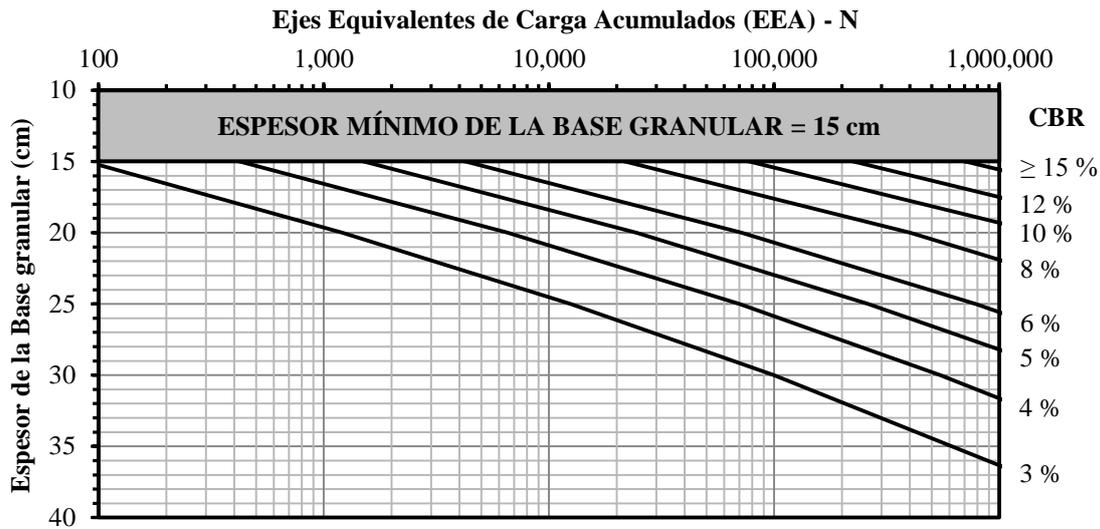


Figura 9 Carta de diseño para nivel de servicio/categoría del camino "D" (Confiabilidad de diseño 50%)

6 Conclusiones

El trabajo permitió obtener algunas conclusiones referidas tanto al método de obtención del bloque asfáltico, el análisis estructural del pavimento articulado y las cartas de diseño propuestas:

- Se obtuvieron bloques asfálticos con incorporación de material RAP de manera no tradicional a través de la construcción de un tramo de prueba de un pavimento flexible y posterior cortado de su capa de rodadura. Este método es promisorio y viable pero debe ser ajustado para garantizar no solo la producción en masa de los bloques sino también con las tolerancias de sus dimensiones según sea el requerimiento del diseñador o las condiciones específicas de construcción (buenas condiciones de prefabricación).
- Teniendo en cuenta la capacidad de producción de la planta de mezclas asfálticas utilizada, el contenido máximo de incorporación de RAP fue del 25%.
- Los módulos retro-calculados para todos los tramos estudiados (mezclas con diferentes contenidos de RAP, patrones de colocación y tamaños del bloque) oscilan aproximadamente entre 300 y 800 MPa. El módulo elástico de la capa de bloques asfálticos recomendado para la elaboración de las cartas de diseño es de 550 MPa, el cual es un valor representativo de los módulos de todos los tramos de estudio.
- Este trabajo propone dos cartas gráficas para el diseño de un pavimento articulado con bloques asfálticos utilizando la función de transferencia propuesta por el método sudafricano de diseño de pavimentos para una condición terminal de 20 mm de ahuellamiento debido a la deformación vertical del suelo de sub-rasante. Para su construcción se emplearon las herramientas de los elementos finitos a través del programa EverStressFE y el método numérico de las diferencias divididas de Newton las cuales brindan facilidad de cálculo, una buena aproximación del fenómeno modelado y permiten obtener soluciones de manera continua y no discretas como lo

hacen muchas cartillas de diseño proponiendo soluciones, en muchos casos, sobredimensionadas.

- Se deben realizar estudios similares para investigar otros métodos de producción de los bloques y/o ajustar el desarrollado en este trabajo para potenciar la aplicación de la alternativa de los pavimentos articulados de bloques asfálticos para vías de bajo volúmenes de tránsito y realizar más mediciones deflectométricas para complementar la caracterización de la capa articulada de bloques.

7 Referencias

- [1] F. Hong, R. Guo y F. Zhou, «impact of Recycled Asphalt Pavement Material Variability on Pavement Performance,» *Road Materials and Pavement Design*, vol. 15, n° 4, pp. 841-855, 2014.
- [2] A. Faiz, «The Promise of Rural Roads - Review of the Role of low-Volume Roads in Rural Connectivity, Poverty Reduction, Crisis Management, and Livability (Transportation Research Circular E-C167),» Transportation Research Board, 2012.
- [3] C. Marín, *Investigación y desarrollo de pavimentos articulados de bloques asfálticos con RAP y verificación del desempeño a través de la implementación de un modelo físico experimental*, Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, 2015.
- [4] LNV, «Manual de Carreteras Volumen N°5,» Ministerio de Obras Públicas de Chile, Santiago de Chile, 2014.
- [5] Washington State Department of Transportation, *EVERSERIES USER'S GUIDE - Pavement Analysis Computer Software and Case Studies*, 2005.
- [6] SHELL, *Shell Pavement Design Manual-Asphalts Pavements and Overlays for Road Traffic*, London: SHELL International Petroleum Company Ltd, 1978.
- [7] C. Marín y G. Thenoux, «Validation of the Polygon-Of_voids Tool for Asphalt Mixtures with RAP,» *Revista de la Construcción*, vol. 13, n° 1, pp. 56-63, 2014.
- [8] Huang, Shu y Vukosavljevic, «Laboratory investigation of cracking resistance of hot-mix asphalt field mixtures containing screened reclaimed asphalt pavement,» *Journal of materials in civil engineering*, vol 23, N° 11, pp. 1535-1543, 2011.
- [9] J. Chen, P. Chu y K. Lin, «Characterization of Binder and Mix Properties to Detect Reclaimed Asphalt Pavement Content in Bituminous Mixtures,» *Canadian Journal of Civil Engineering*, n° 34, pp. 581-588, 2007.