

# Performance of foamed bitumen pavements in accelerated testing facility

## Desempeño de pavimentos estabilizado con asfalto espumado en una prueba de pavimentos a escala real y carga acelerada

Alvaro Gonzalez<sup>1\*</sup>, Misko Cubrinovski<sup>\*\*</sup>, Bryan Pidwerbesky<sup>\*\*\*</sup>, David Alabaster<sup>\*\*\*\*</sup>

\* Universidad del Desarrollo, Santiago. CHILE

\*\* University of Canterbury. NEW ZEALAND

\*\*\* Fulton Hogan Ltd. NEW ZEALAND

\*\*\*\* New Zealand Transport Agency. NEW ZEALAND

Fecha de Recepción:01/11/2011

Fecha de Aceptación:01/04/2012

PAG 05 - 17

### Abstract

*One of the key principal goals of pavement asset management is to develop and implement cost-effective pavement construction and maintenance strategies that achieve the required levels of service and performance. A sustainable, cost-effective technique for rehabilitating pavements is foamed bitumen stabilization. This paper presents a study on the performance of foamed bitumen pavements tested in the Canterbury Accelerated Pavement Testing Indoor Facility (CAPTIF), for full scale testing of pavements. Six pavement sections were tested; the variables were bitumen and cement content; one control section with the untreated unbound material was tested. Results showed that surface deflections decreased at sections with higher bitumen contents. After the application of 5,710,000 Equivalent Standard Axles (ESAs), the sections stabilised with cement only, bitumen only, and the control section all showed large amounts of rutting. Conversely, little rutting was observed in the three sections stabilised with foamed bitumen and 1.0% cement, showing that cement and FB together significantly improve pavement performance. The rutting results were used to develop models to describe the stable and unstable performance of the tested pavements. The paper concludes by outlining some of the practical benefits of utilising this technology in pavement asset management.*

*Keywords: pavement recycling, foamed bitumen, full-scale testing, rutting models*

### Resumen

Uno de los objetivos claves de la gestión de pavimentos es desarrollar e implementar una estrategia de construcción y mantenimiento rentables, con el fin de alcanzar niveles requeridos de servicio y desempeño. Una técnica rentable y sustentable para la rehabilitación de pavimentos es la de estabilización o reciclado con asfalto espumado (AE). Este artículo presenta un estudio sobre el desempeño de pavimentos estabilizados con asfalto espumado en el Canterbury Accelerated Pavement Testing Indoor Facility CAPTIF. CAPTIF es un laboratorio a escala real para pavimentos ubicado en Nueva Zelanda, que permite aplicar un gran número de cargas de tráfico en un breve período de tiempo. Seis secciones de pavimentos con distintos contenidos de asfalto y cemento fueron ensayadas en CAPTIF. Los resultados del experimento mostraron que las deflexiones disminuyen en las secciones con mayor contenido de asfalto espumado. Luego de aplicar más de un millón de ciclos de carga, las secciones estabilizadas sólo con cemento, sólo con asfalto y la sección sin estabilizar mostraron un deterioro significativo en forma de ahuellamiento. Por otro lado, las secciones que fueron estabilizadas con AE y cemento mostraron un buen desempeño, demostrando que el cemento y el AE juntos mejoran significativamente el desempeño del pavimento. Los resultados de ahuellamiento fueron empleados para desarrollar modelos y describir el deterioro estable y acelerado de los pavimentos en estudio, lo que puede ser utilizado para una mejor gestión de los pavimentos estabilizados con asfalto espumado

**Palabras Clave:** Reciclaje de pavimentos, asfalto espumado, pruebas de pavimento aceleradas, modelos de ahuellamiento

## 1. Introducción

En Nueva Zelanda más del 95% de los caminos están contruidos con pavimentos granulares. Un pavimento típico de Nueva Zelanda consiste en una superficie asfáltica delgada (que generalmente no excede los 50 mm de espesor), una capa de base (construida de material granular de roca de cantera triturada o de un agregado de fuente local) y una sub-base (que usualmente tiene una o dos capas de material granular). Este tipo de pavimentos han sido adoptados en Nueva Zelanda debido a que en el pasado el agregado de alta calidad era abundante en la mayoría de las regiones de Nueva Zelanda; y debido a que en la mayoría de los caminos de Nueva Zelanda los bajos volúmenes de tráfico no justificaban la incorporación de pavimentos con capas de asfalto de mayor espesor, que generalmente se construyen en caminos de alto tráfico.

## 1. Introduction

*In New Zealand more than 95% of the roads are constructed of flexible unbound granular pavements. A typical New Zealand pavement consist of a thin surface (usually not exceeding 50 mm thickness), the basecourse (which is constructed from unbound granular material that is usually crushed quarried rock or locally sourced aggregate) and the subbase (which is usually one or sometimes two layers of unbound granular aggregate). This pavement type has been adopted in New Zealand because in the past high quality aggregate has been readily available in most regions of the country and because in most New Zealand roads, low traffic volumes do not justify the incorporation of thick asphalt pavements, usually constructed in heavy trafficked roads.*

<sup>1</sup> Autor de correspondencia / Corresponding author:  
E-mail: aagonzalez@ingenieros.udd.cl

Sin embargo en la década pasada algunas áreas de Nueva Zelanda comenzaron a enfrentar un problema complejo con el suministro de agregados de alta calidad para la construcción de caminos. Una alternativa viable para reducir la explotación de agregados de buena calidad es la estabilización o reciclaje de pavimentos. Por otro lado, Nueva Zelanda importa crudo de petróleo, y por lo tanto los costos de producción de asfalto dependen en gran medida de los precios internacionales del petróleo. Diversas investigaciones han demostrado que el reciclaje de pavimentos utilizando asfalto espumado, reduce el consumo de petróleo y energía (Thenoux et al., 2006; Jenkins, 1994), así como el uso de agregados. Por lo tanto, el asfalto espumado es una alternativa atractiva para la rehabilitación de caminos.

El reciclaje en frío de pavimentos in situ utilizando asfalto espumado es una técnica de construcción que recupera el pavimento flexible envejecido, añadiendo simultáneamente agentes estabilizadores para mejorar las propiedades del material recuperado. Esta técnica recicla el 100% de los agregados existentes, reduciendo el consumo de agregados y el transporte de materiales en los caminos rehabilitados. Aunque existen otros tipos de técnicas de reciclaje (ej. Reciclaje en frío en planta), ésta es considerada como una solución atractiva para reducir el problema del suministro de agregados en Nueva Zelanda.

Aunque el reciclaje en frío de pavimentos in situ utilizando asfalto espumado es una alternativa atractiva para reducir el problema de suministro de agregados de alta calidad, los diseñadores de pavimentos que intentan emplear materiales alternativos en Nueva Zelanda se ven seriamente limitados por la falta de datos sobre el desempeño de un gran número de materiales estabilizados.

Con el fin de reducir esta incertidumbre, un importante proyecto de investigación fue realizado en Nueva Zelanda, con el fin de estudiar los efectos de la estabilización con asfalto espumado (AE) sobre el desempeño, resistencia y características de deformación de los pavimentos. La investigación consistió en un estudio de laboratorio, en los cuales una serie de ensayos fueron llevados a cabo sobre mezclas de material estabilizado con AE, y también una prueba a escala real, en la que se aplicó carga acelerada sobre pavimentos estabilizados con AE.

El experimento a escala real fue llevado a cabo en el Canterbury Accelerated Pavement Testing Indoor Facility, CAPTIF, que será descrito más adelante en este artículo. En CAPTIF se construyeron seis pavimentos empleando distintos contenidos de asfalto y cemento. Una vez construidos los pavimentos se les aplicó carga acelerada y la respuesta de éstos, tales como deformación de la superficie (ahuellamiento) y deflexiones, fueron periódicamente medidas durante el curso de la prueba. Un número aproximado a 5.710.000 Ejes Estándares Equivalentes de 80 kN (ESAs) fueron aplicados a las seis secciones de pavimentos. Los resultados del experimento mostraron que la estabilización con asfalto espumado tiene un efecto positivo importante en el desempeño de los pavimentos estudiados, como se describirá a continuación en este artículo.

*However in the last decade areas of New Zealand started to face a complex problem in the supply of high quality aggregates for road construction. A viable alternative to reduce the exploitation of these aggregates is the stabilization or recycling of pavements. Furthermore, New Zealand imports crude oil and therefore its production costs for bitumen are highly dependant on international oil prices. Research has demonstrated that pavement recycling using foam bitumen reduces energy and oil consumption (Thenoux et al., 2006; Jenkins, 1994), as well as aggregate use, and therefore foam bitumen becomes an attractive alternative for road rehabilitation.*

*Cold in place recycling of pavements using foamed bitumen is a construction technique that reclaims the existing distressed flexible pavement, simultaneously adding stabilising agents to improve the properties of the reclaimed material. The technique recycles 100% of the existing aggregates, reducing aggregate consumption and transportation of materials in the rehabilitation of roads, and although other types of recycling techniques exist (i.e. cold-in-plant), it is considered an attractive solution to reduce the aggregate supply problem in New Zealand.*

*Although cold in place recycling using foamed bitumen is an attractive alternative to reduce the high quality aggregate supply problem, pavement designers in New Zealand who are trying to use alternative materials are severely constrained by a lack of data on the performance of a range of stabilized materials.*

*A large research project was conducted in New Zealand to study the effects of foamed bitumen (FB) stabilisation in the performance, strength and deformational characteristics of pavements. The investigation consisted of a laboratory study, in which different types of tests were conducted, and a full-scale test, in which accelerated load was applied to FB pavements.*

*The full-scale experiment was carried out at the Canterbury Accelerated Pavement Testing Indoor Facility (CAPTIF), further described in this paper. Six pavements were constructed using different contents of bitumen and cement. Accelerated loading was applied to the pavement structures and the pavement responses, such as surface deformation (rutting), surface deflections and strains, were periodically recorded during the execution of the test. A total number of approximately 5.710.000 equivalent standard axles (ESAs) were applied to the pavement sections. The results showed that foamed bitumen stabilization has an important effect on the performance of the pavements studied, as further detailed in this paper.*

## 2. Materiales y diseño de la mezcla

### 2.1 Agregados

Los agregados empleados en la prueba a tamaño natural fueron una mezcla de material granular grueso 'H40' y arena ('AP5'). El H40 es un agregado chancado, de 40 mm tamaño máximo, con una gravedad específica de 2,69 t/m<sup>3</sup>, densidad seca máxima de 2,22 t/m<sup>3</sup> y la Humedad Óptima de Compactación (HOC) de 4,0%. El agregado H40 cumplió con los siguientes requerimientos buscados en el proyecto:

- Es un agregado representativo empleado en Nueva Zelandia para la construcción de caminos, que tiene una granulometría de acuerdo a la especificación vigente TNZ M/4, para agregados de capa de base (TNZ 2006).
- La fuente del agregado debía estar ubicada en una región de Nueva Zelandia donde no se consiguen agregados de alta calidad para la construcción de caminos.
- La calidad del agregado debía ser de moderada a baja. En tal caso, los efectos de estabilización debieran ser más relevantes que en un agregado de alta calidad.

La distribución del tamaño de partículas del agregado H40 no cumplió la banda granulométrica para la estabilización con AE (Figura 1) (Academia de Asfaltos 2002). Por lo tanto, la distribución del tamaño de partículas del H40 fue ajustada empleando polvo de trituración AP5, con el fin de llevar el agregado H40 dentro de la banda granulométrica recomendada. La proporción final de 85/15 (H40/AP5) por peso, fue adecuada para satisfacer los requerimientos de granulometría para estabilización con AE. El tamaño máximo de partícula del AP5 es de 5 mm, densidad máxima seca es de 1,82 t/m<sup>3</sup> y la HOC es de 9,0%. No se encontraron finos plásticos en la mezcla del agregado H40/AP5, empleando la norma estándar ASTM D4318-05 (ASTM, 2005). La HOC del H40/AP5 fue de 6,0%, determinado por medio de la prueba de Compactación con Martillo Vibrador de Nueva Zelandia NZS 4402.4.1.3:1986 (NZS, 1986).

### 2.2 Asfalto

Un asfalto con grado de penetración 80/100, comúnmente utilizado en Nueva Zelandia para la estabilización con AE, fue empleado para la prueba a escala real en CAPTIF. Las características de la espuma fueron investigadas utilizando el laboratorio de AE modelo WLB10, empleado por muchos investigadores y expertos en la producción de asfalto espumado. Los resultados mostraron que un 2.5% de agua espumante en combinación con una temperatura de asfalto de 170 °C arroja un Índice de Espuma de 128 (NZS, 1986), considerado como buena calidad de espuma (Asphalt Academy, 2002). Este índice es consistente con las propiedades de los asfaltos espumados producidos en Nueva Zelandia (Saleh, 2004a).

## 2. Materials and mix design

### 2.1 Aggregates

The aggregates used in the full scale testing of pavements were a blend of coarse granular soils 'H40' and sand material ('AP5'). The H40 is a crushed aggregate of 40 mm maximum size, with specific gravity of 2.69 t/m<sup>3</sup>, maximum dry density of 2.22 t/m<sup>3</sup> and optimum moisture content (OMC) of 4.0%. The H40 aggregate satisfied the following requirements:

- To be a representative aggregate used in New Zealand for road construction and to have a grading in compliance with the current TNZ M/4 specification for basecourse aggregate (TNZ 2006)
- The aggregate source should be located in a region of New Zealand where high-quality aggregates are not readily available for road construction.
- The quality of the aggregate should be moderate to poor according to the experience of road engineering practitioners. In such case, the effects of stabilisation should be more relevant than in a good quality aggregate.

The H40 aggregate particle size distribution was not directly suitable for FB stabilisation (Figure 1) because it was too coarse according to the recommended grading for FB mixes (Asphalt Academy 2002). Therefore, the H40 particle size distribution was adjusted using an AP5 crusher dust to bring the aggregate into the recommended grading zone. A final blend of 85/15 (H40/AP5) by mass was found suitable to satisfy the grading requirements for FB stabilisation. The maximum particle size of the AP5 is 5 mm, the maximum dry density is 1.82 t/m<sup>3</sup>, and the OMC is 9.0%. No plastic fines were found in the H40/AP5 aggregate blend using the ASTM D4318-05 standard (ASTM, 2005). The OMC of the H40/AP5 was 6.0%, determined following the New Zealand Vibrating Hammer Compaction test NZS 4402.4.1.3:1986 (NZS, 1986).

### 2.2 Bitumen

An 80/100 grade bitumen commonly used for FB stabilisation in New Zealand was used for the full scale testing of pavements. The characteristics of the foam were investigated using the foamed bitumen laboratory model WLB10, which has been used by many researchers and practitioners for the production of bitumen foam. The results showed that 2.5% foaming water in combination with a bitumen temperature of 170°C yields a Foam Index (NZS, 1986) of 128, which is considered a good foam quality (Asphalt Academy, 2002), and is consistent with the properties of bitumen foams produced in New Zealand (Saleh, 2004a).

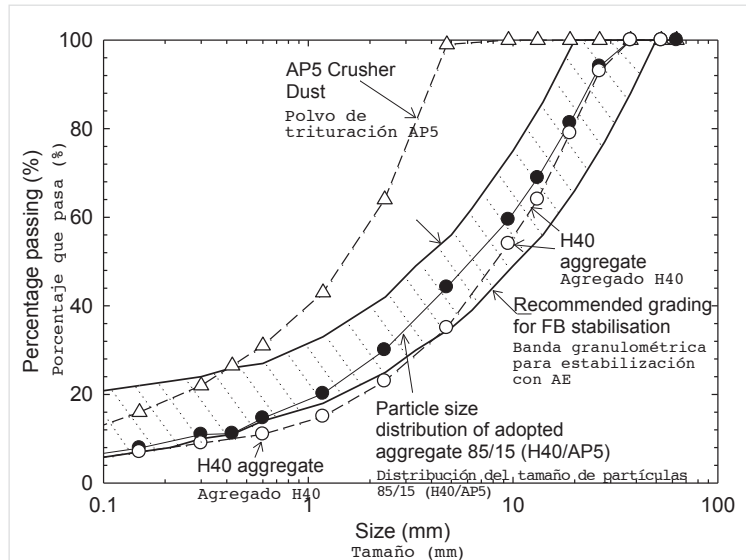


Figure 1. Particle size distribution of H40, AP5 and H40/AP5 mix adopted for foamed bitumen stabilisation

Figura 1. Distribución del tamaño de partículas de H40, AP5 y mezcla H40/AP5 adoptadas para estabilización con asfalto espumado

### 2.3 Diseño de la mezcla

Los resultados del ensayo de resistencia a la tracción indirecta (ITS por sus siglas en inglés) fueron empleados para determinar el contenido óptimo de asfalto espumado. El ITS fue determinado de acuerdo a la norma NZS 3112: Parte 2:1986. La velocidad de carga aplicada durante el ensayo ITS fue de 50,8 mm/min. Las muestras fueron preparadas con contenidos de asfalto de 0%, 1%, 2%, 3% y 4%, más un 1% de cemento.

Los resultados indicaron que el ITS aumenta cuando el contenido de asfalto aumenta hasta un 3,0%. Con un 4,0% de asfalto el ITS disminuye, demostrando así que un gran porcentaje de asfalto puede influir negativamente el esfuerzo de tracción de la mezcla para los materiales estudiados.

### 2.3 Mix design

Results from the Indirect Tensile Strength (ITS) test were used to determine the optimum foamed bitumen content. The ITS was determined in accordance with NZS 3112: Part 2:1986. The loading speed applied during the test corresponds to 50.8 mm/min. The specimens were prepared with 0%, 1%, 2%, 3% and 4% bitumen contents and a common 1% cement.

The results indicated that ITS increases when the bitumen content increases up to about 3.0%, and then from 4.0%, the ITS value decreases, showing that a large percentage of bitumen may negatively influence the tensile strength of the mix for the materials studied.

## 3. Experimento a escala real

### 3.1 Diseño y construcción

#### Diseño Estructural de Pavimentos

El diseño estructural de pavimentos fue realizado empleando la guía Sudafricana de Diseño (Asphalt Academy, 2002) y el suplemento Neozelandés para el diseño de pavimentos (Austroads, 2005). Los detalles del diseño estructural no son presentados en este artículo, sin embargo una capa de base de 20 mm combinada con una relativamente débil subrasante (60-80 MPa) entregó una capacidad estructural del pavimento cercana a  $1 \times 10^6$  ESAs de 80 kN empleando ambos métodos de diseño.

## 3. Full-scale study

### 3.1 Design and construction

#### Structural Design of Pavements

The structural design of pavements was carried out using the South African interim guidelines (Asphalt Academy, 2002) and the New Zealand supplement to the Austroads pavement design guidelines (Austroads, 2005). Details of the structural design are not presented in this paper, but a 200-mm basecourse combined with a relatively weak (60-80 MPa) subgrade provided a pavement structural capacity close to  $1 \times 10^6$  ESAs of 80 kN using both the design methods.

#### Descripción del CAPTIF descripción y configuración del experimento

CAPTIF está ubicado en Christchurch, Nueva Zelanda. Consiste en una pista circular de 50 metros de largo contenida dentro de un contenedor de concreto de 1,5 m de profundidad y 4,0 metros de ancho, en el cual el contenido de humedad de los materiales de pavimento pueden ser controlados y se conocen las condiciones de borde (Figura 2a).

#### CAPTIF Description and Layout Design

CAPTIF is located in Christchurch, New Zealand. It consists of a 58-m long circular track contained within a 1.5-m deep and 4.0-m wide concrete tank in which the moisture content of the pavement materials can be controlled and the boundary conditions are known (Figure 2a).

En la plataforma central se ubica la maquinaria y elementos eléctricos necesarios para accionar el sistema. Una estructura metálica deslizante montada sobre la plataforma central puede desplazarse horizontalmente hasta 1 m. Este movimiento radial permite que la huella de las ruedas varíe en forma lateral y puede ser usada para tener dos “vehículos” operando en huellas de ruedas independientes. En los extremos de esta estructura, dos brazos radiales se conectan a las unidades de Carga Simulada y Emulador de Vehículo (SLAVE, en inglés) (Pidwerbesky, 1995).

A center platform carries the machinery and electronics needed to drive the system. Mounted on this platform is a sliding frame that can move horizontally by 1 m. This radial movement enables the wheel paths to be varied laterally and can be used to have the two ‘vehicles’ operating in independent wheel paths. At the ends of this frame, two radial arms connect to the Simulated Loading and Vehicle Emulator (SLAVE) units (Pidwerbesky, 1995).

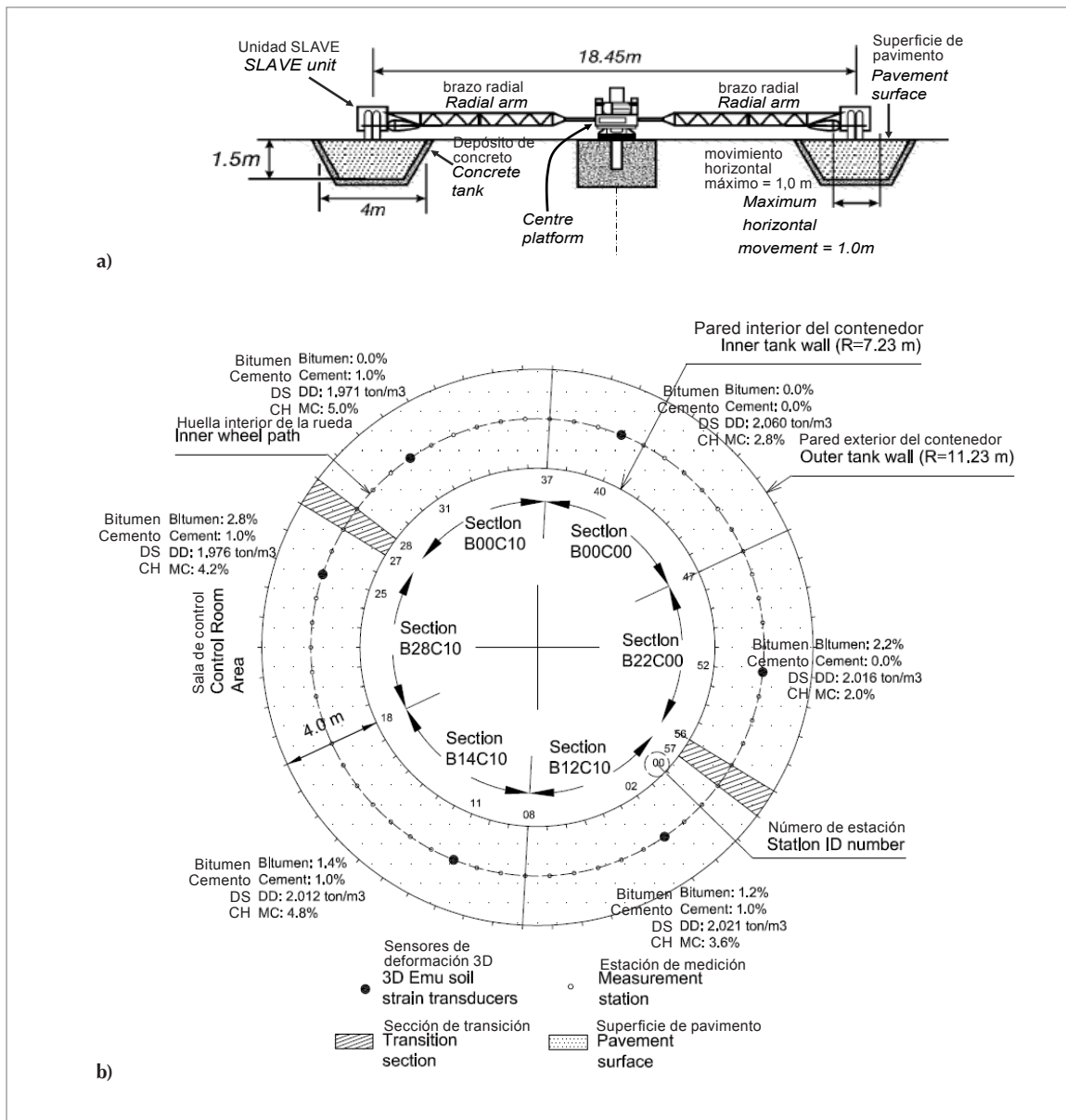


Figure 2. CAPTIF (a) cross section; (b) Top view of the foamed bitumen test (DD = Dry Density, MC = Moisture Content), after (González et al., 2004)

Figura 2. CAPTIF (a) Perfil; (b) Vista superior del experimento con asfalto espumado (DD = Densidad Seca, MC = Contenido de Humedad), luego de (González et al., 2004)

CAPTIF permite realizar pruebas con hasta seis secciones de pavimentos de aproximadamente 10 m de longitud cada una. Se estabilizaron cuatro secciones empleando 1% de cemento con diferentes contenidos de asfalto. Una sección fue conservada como control sólo con material H40, otra sección solo tenía AE, esto con el fin de separar los efectos de AE con el cemento. La vista superior de la pista de prueba se presenta en la Figura 2b, en la cual seis secciones de pavimentos son detalladas. Las secciones fueron nombradas B12C10, B14C10, B28C10, B00C10, B00C00 y B22C00, donde los dos primeros dígitos (después de la letra B) indican el contenido de asfalto; y los dos últimos (luego de la letra C) indican el contenido de cemento. Por ejemplo, la sección B14C10 fue construida agregando 1,4% de AE y 1,0% de cemento. La sección B28C10 tenía aproximadamente el contenido óptimo de AE según los ensayos de laboratorio ITS.

### **Materiales y Construcción**

#### **Subrasante**

La parte superior de la subrasante de 525 mm es de arcilla, extendida en capas de 225, 150 y 150 mm y compactada empleando un rodillo disponible en CAPTIF. El análisis de retrocálculo empleando datos FWD proporcionó una rigidez de la sub-rasante de 60 MPa aproximadamente, que es coherente con el módulo requerido según el diseño estructural de pavimentos.

#### **Proceso de estabilización**

Los detalles sobre el proceso de estabilización se pueden encontrar en [9]. Doscientas toneladas de agregados chancados H40 fueron transportados a CAPTIF. Para el proceso de estabilización se excavaron zanjas fuera del edificio CAPTIF. En las zanjas se extendieron capas de material agregado chancado H40 y AP5, y luego fueron compactadas al 95% de su densidad máxima seca con contenidos óptimos de humedad, para que la relación de peso final 85/15 obtenida en el laboratorio fuera también alcanzada en terreno. Una vez que el material granular compactado estaba listo, las zanjas fueron estabilizadas con la máquina de reciclado. El material estabilizado fue transportado hasta el edificio CAPTIF por cargadores frontales. Una máquina pavimentadora fue empleada para colocar el material de la capa de base y se utilizó un rodillo para su compactación. Antes de de colocar la capa de superficie final, las secciones fueron curadas a temperatura ambiente por 30 días.

#### **Capas de superficie**

Todas las secciones fueron selladas con un tratamiento superficial simple. Después de una semana de la construcción del sello, todas las secciones fueron revestidas con una capa de mezcla asfáltica AC10 en caliente. El grosor aproximado de toda la superficie asfáltica fue de 20 mm. Antes de sellar, se hicieron mediciones de densidad y humedad, empleando un densímetro nuclear directamente sobre la capa de base. Los contenidos de densidad seca y humedad están incluidos en la Figura 2b.

*CAPTIF enables up to six pavement sections of about 10 m length each to be tested. Four sections were stabilised using 1% cement at different bitumen contents. One section was retained as a control with the H40 material only, and another section had FB only, to separate the effects of the FB with the cement. A top view of the pavement test track is presented in Figure 2b, in which the six pavement sections are depicted. The sections were named B12C10, B14C10, B28C10, B00C10, B00C00 and B22C00, where the first two digits (after B) indicate the bitumen content, and the last two (after C) indicate the cement content. For instance, section B14C10 was built adding 1.4% of FB and 1.0% cement. Section B28C10 had approximately the 'optimum' FB content determined from ITS test.*

### **Materials and Construction**

#### **Subgrade**

*The top 525 mm of the subgrade was clay, extended in lifts of 225, 150 and 150 mm, and compacted using a roller available at CAPTIF. Back-calculation analysis using FWD data yields a subgrade stiffness of 60 MPa approximately, which is in agreement with the target stiffness from the structural design of pavements.*

#### **Stabilisation process**

*Details of the stabilisation process can be found in (González et al., 2004). Two hundred tonnes of H40 crushed aggregates were transported to CAPTIF. For the stabilisation process, trenches were excavated outside the CAPTIF building. Layers of H40 crushed aggregate material and AP5 were laid and compacted to 95% of maximum dry density at their optimum moisture contents so that the target mass ratio of 85/15 obtained in the laboratory mix design was achieved in the field. Once the untreated material was ready the trenches were stabilised with the recycling machine. The stabilised material was transported into the CAPTIF building by loaders. A paver was used to place the basecourse material and a steel roller was used for compaction. Before laying the final surface layer, the sections were cured at ambient temperature for 30 days.*

#### **Surface layers**

*All sections were sealed with a single coat chipseal. After a week to allow the chipseal to set up, all sections were surfaced with a skim coat of AC10 hot mix covering the top of the chipseal. The approximate thickness of this surface was 20 mm. Before the sealing, density and moisture measurements were taken using a nuclear gauge directly over the basecourse. Dry densities and moisture contents are included in Figure 2b.*

Durante el curso del experimento y después de la aplicación de 200.000 ciclos de carga, la superficie original asfáltica comenzó a mostrar desgaste. Una capa delgada de mezcla de asfalto en caliente (HMA) de 30 mm fue colocada sobre la superficie original, alcanzando un grosor total de superficie de 50 mm para el resto del proyecto.

### Instrumentación

La instrumentación del pavimento en CAPTIF incluye transductores de deformación 3D (Dawson, 1994) para medir las deformaciones verticales, transversales y longitudinales en el pavimento. Detalles de las mediciones de deformación recogidas durante este proyecto pueden ser encontrados en [9]. La vista final de perfil de todas las secciones de pavimentos es mostrada en la Figura 3.

During the execution of the experiment and after the application of 200.000 load cycles, the original thin surface started to show wear. A thin hot mix asphalt (HMA) layer of 30 mm was laid over the original surface, leading to a total surface thickness of approximately 50 mm for the rest of the project.

### Instrumentation

The pavement instrumentation at CAPTIF includes 3D Emu (Dawson, 1994) soil strain transducers to measure the vertical, transverse and longitudinal strains in the pavement. Details of the strain measurements collected during this project can be found in González. The final cross section adopted in all pavement sections is shown in Figure 3.

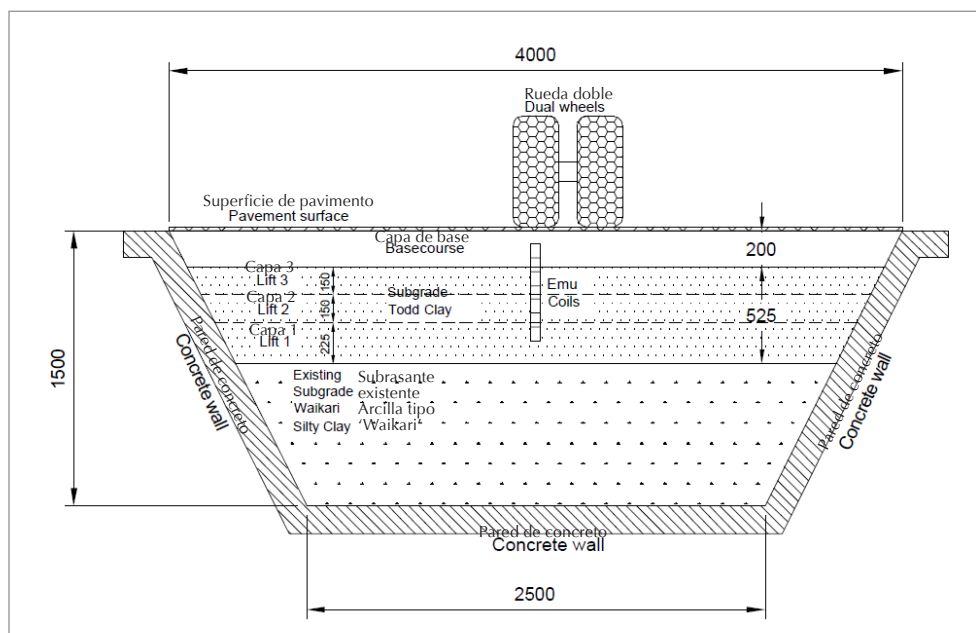


Figure 3. Cross section of the pavements tested at CAPTIF

Figura 3. Perfil de los pavimentos ensayados en CAPTIF

### 3.2 Procedimiento experimental

#### Velocidad y secuencia de carga

La carga consistió en una rueda doble de camión, con una separación de 350 mm entre los centros de los neumáticos, inflados a 700 kPa de presión. El proyecto original pretendía que una carga constante de 40 kN fuera aplicada en cada unidad SLAVE. Sin embargo, y puesto que se registró poco ahuellamiento durante las etapas iniciales del proyecto, la carga fue aumentada a 50 kN después de 100.000 ciclos de carga y nuevamente a 60 kN después de 300.000 ciclos de carga.

La velocidad de los vehículos fue mantenida constante a 40 km/hr durante la mayor parte del proyecto. La carga fue aplicada sobre una huella, con un desplazamiento horizontal de 100 mm al interior y exterior.

### 3.2 Experimental procedure

#### Loading sequence and speed

The load was a dual truck tire with a separation of 350 mm between the centers of the tires inflated to 700 kPa. The original project intended that a constant loading of 40 kN would be applied for each SLAVE unit. However, since little rutting was measured during the early stages of the project, the load was increased to 50 kN after 100,000 load cycles and again to 60 kN after 300,000 load cycles.

The speed of the vehicles was kept constant at 40 km/h during most of the project. The load was applied on one wheel path with a lateral wandering of 100 mm.

### 3.3 Análisis del desempeño del pavimento

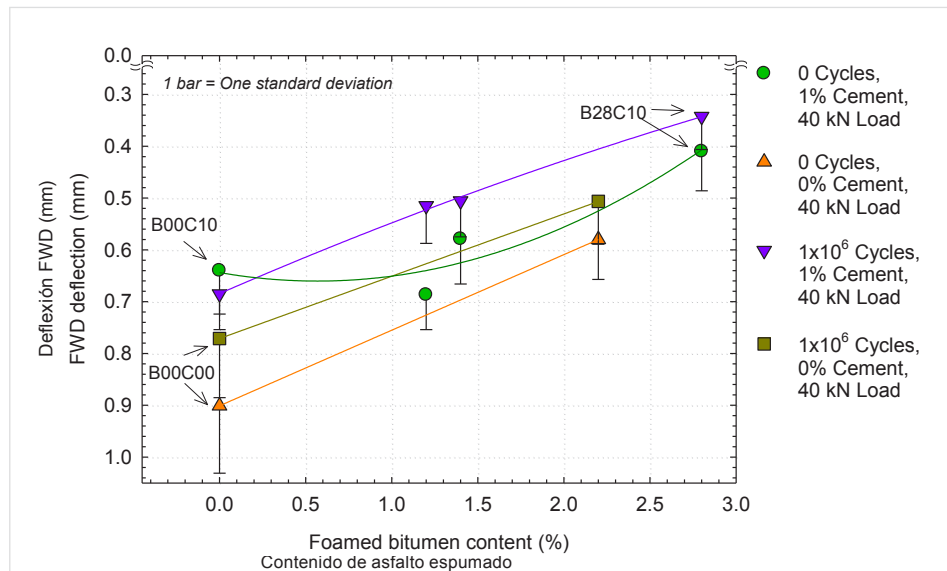
#### Deflexiones

Las deflexiones medidas con el Deflectómetro de Impacto (FWD) con carga de 40 kN son presentadas en la Figura 4. Los resultados corresponden a deflexiones medidas antes de aplicar cargas de tráfico con los vehículos SLAVE (0 ciclos de carga) y después de  $1 \times 10^6$  ciclos de carga. A  $2 \times 10^5$  ciclos de carga, la capa superficial de asfalto fue recubierta con 30 mm de HMA. La sección sin estabilizar (B00C00) mostró deflexiones considerablemente mayores en comparación con las otras secciones. De la Figura 4 se puede observar además que cemento y asfalto tienen un efecto importante en la reducción de las deflexiones de los pavimentos estudiados, como lo demuestra la menor deflexión registrada en la sección con el mayor contenido de asfalto y 1% de cemento (B28C10).

### 3.3 Analysis of pavement performance

#### Deflection tests

FWD deflections with a 40 kN load are presented in Figure 4. The results correspond to deflections measured before the trafficking of the sections (0 load cycles) and after  $1 \times 10^6$  load cycles. At  $2 \times 10^5$  load cycles the thin surface layer was overlaid with 30 mm of HMA. The unbound section (B00C00) shows considerably higher deflections in comparison with the other sections. Both cement and bitumen have an important effect in reducing the deflections of the pavements studied, as shown by the lowest deflection recorded in the section at the highest bitumen content and 1% cement (B28C10).



**Figure 4.** FWD deflections at 40 kN before trafficking (0 load cycles) and after  $1 \times 10^6$  load cycles  
**Figura 4.** Deflexiones FWD a 40 kN antes del tráfico (0 ciclos de carga) y después de  $1 \times 10^6$  ciclos de carga

#### Ahuellamiento

Las mediciones promedio del ahuellamiento para cada sección de pavimento se presentan en la Figura 5. Las curvas muestran el típico desempeño de los pavimentos en una fase inicial de densificación durante la carga inicial del vehículo, seguida por una fase de deformación constante. Cuando la carga fue incrementada a 50 kN, se observó un aumento en la tasa de ahuellamiento similar a una fase inicial de densificación. Desde 300.000 ciclos de carga (después de construir el recapado de HMA), el ahuellamiento aumentó en forma lineal hasta aproximadamente 1.000.000 de ciclos de carga en todas las secciones.

Después de 1.000.000 ciclos de carga, las secciones B00C10, B00C00 y B22C00 comenzaron a mostrar grandes cantidades de deformación vertical y ahuellamiento; mientras que las secciones B12C10, B14C10 y B28C10 se desempeñaron adecuadamente y se observó poca diferencia entre ellas. Los resultados de pruebas de pavimentos indican que la estabilización con AE y cemento mejoraron el desempeño de los pavimentos. El ahuellamiento de las secciones B12C10, B14C10 y B28C10 fueron consistentemente menores que en las otras tres secciones.

#### Average Rutting

The averaged rutting measurements for each pavement section are presented in Figure 5. The curves presented show the typical performance of pavements with a bedding-in phase during the initial vehicle loading, followed by a plateau phase. When the load was increased to 50 kN another increase in the rutting rate was observed. From 300,000 load cycles (after constructing the HMA overlay) the rutting increased approximately linearly up to 1,000,000 load cycles for all sections.

After 1,000,000 load cycles, sections B00C10, B00C00 and B22C00 started to show large amounts of heaving and rutting, while sections B12C10, B14C10 and B28C10 performed well, and little difference among them was observed. The pavement test results presented indicate that stabilisation using FB and cement improved the performance of the pavements. The rutting of sections B12C10, B14C10 and B28C10 was consistently lower than in the other three sections.



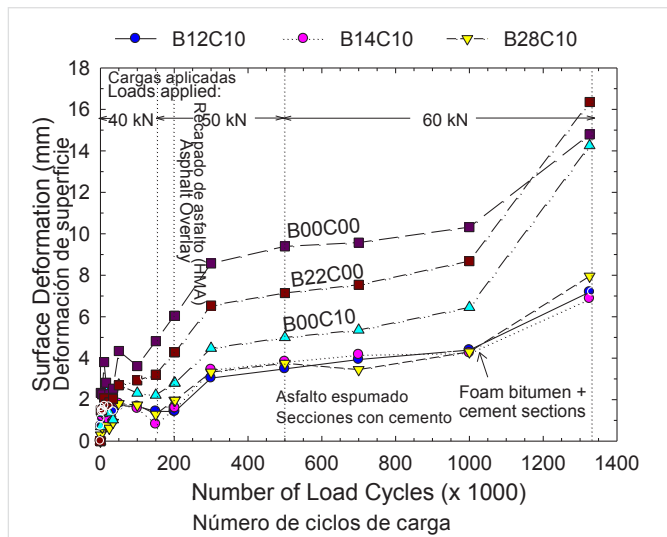


Figure 5. Average rutting  
Figura 5. Ahuellamiento Promedio

Al final de la prueba, se encontró poca diferencia entre las mediciones de ahuellamiento de las secciones estabilizadas con AE y cemento (secciones B12C10, B14C10 y B28C10). Para acelerar la deformación de la superficie en estas secciones, se decidió cortar parte de las secciones de pavimento, desde la superficie del HMA hasta la parte superior de la capa de base (cortes de 50 mm de profundidad). Los cortes se ubicaron en forma longitudinal a la pista a una distancia de 200 mm, y la superficie fue cortada con sierra desde las estaciones 3 a 6 de la sección B12C10, de la 14 a 17 en la sección B14C10, y de la 20 a 23 en la sección B28C10. Una vez finalizado el trabajo de corte, se aplicó agua de manera uniforme sobre la superficie. Con un flujo constante de agua, se aplicaron ciclos de carga adicionales de 60 kN con los vehículos SLAVE. El agua produjo mayor deformación y agrietamiento de la superficie en las secciones de pavimento. Sin embargo, el agua penetró en la sub-rasante provocando expansión de esta capa y modificó los niveles finales de la estructura del pavimento. Luego de aplicar una carga adicional de 42.000 ciclos, bajo condiciones húmedas, la sección B12C10 comenzó a mostrar un extenso agrietamiento y además deformación de la superficie, en comparación con las otras dos secciones, con evidencia de pérdida de finos (Figura 6). Por el contrario, no se observó agrietamiento en las secciones B14C10 y B28C10.

By the end of the test little difference was found in the rutting measurements of sections stabilized with foam bitumen and cement (sections B12C10, B14C10 and B28C10). To accelerate the surface deformation in these sections it was decided to cut part of the pavement sections down from the HMA surface to the top of the basecourse (50 mm-deep cuts). The cuts were 200 mm apart, and the surface was sawed from stations 3 to 6 in section B12C10, from 14 to 17 in section B14C10, and from 20 to 23 in section B28C10. Once the cutting job was finished, water was uniformly applied over the surface. With a constant water flow, an additional 60 kN load cycles were applied. The load induced further deformation and surface cracking in the pavement sections. Nevertheless, the water penetrated into the subgrade causing swelling of this layer and modifying the final levels of the pavement structure. After the application of an additional 42,000 load cycles under wet conditions, Section B12C10 started to show extensive cracking and further surface deformation in comparison with the other two sections, with evidence of some loss of fines (Figure 6). Conversely, no cracking was observed in sections B14C10 and B28C10.

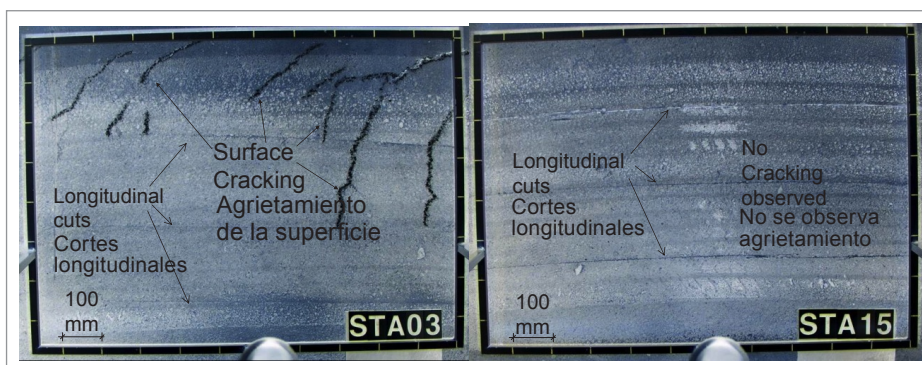


Figure 6. Photo of pavement section B12C10 (left) and B14C10 (right)  
Figura 6. Foto de la sección de pavimento B12C10 (izquierda) y B14C10 (derecha)

**Gráficos de contorno de la deformación vertical de superficie**

Los perfiles transversales de la superficie de cada una de las 58 secciones de pavimentos fueron tomados en varias etapas del proyecto. Los perfiles fueron empleados para calcular la deformación vertical de la superficie (DVS), substrayendo la elevación original de cada perfil transversal (antes de aplicar carga) menos el perfil transversal presente. Luego la DVS fue usada para construir gráficos de contorno de cada sección de pavimento. Los datos de la DVS empleados para construir los gráficos de contorno fueron tomados del centro de cada sección de pavimento. Las estaciones próximas a las áreas de transición (zona entre dos secciones de pavimento), no fueron empleadas para construir los gráficos. La Figura 7 muestra las curvas para las secciones B28C10 y B00C10 después de 500.000 ciclos de carga. La figura muestra, como se esperaba, que las mayores DVS son medidas bajo las trayectorias de las ruedas. Además, la figura muestra el mejor desempeño de la sección B28C10 en comparación con B00C10.

**Vertical surface deformation contour plots**

Transverse surface profiles at each of the 58 pavement stations were taken at several stages of the project. The profiles were used to calculate the vertical surface deformation (VSD) by subtracting the original elevation of each transverse profile (before loading) minus the current transverse profile. The VSD was then used to build contour plots of each pavement section. The VSD data used for the contour plots was taken from transverse location from 1500 mm to 2300 mm, being 1900 mm the location of the centre of the wheel paths. The stations next to the transition zones (area between two pavement sections) were not used to build the contour plot. Figure 7 shows the contour plot for sections B28C10 and B00C10 after 500,000 load cycles. The figure shows that, as expected, higher VSDs are measured under the wheel paths. In addition, the figure shows the better performance of section B28C10 compared to B00C10.

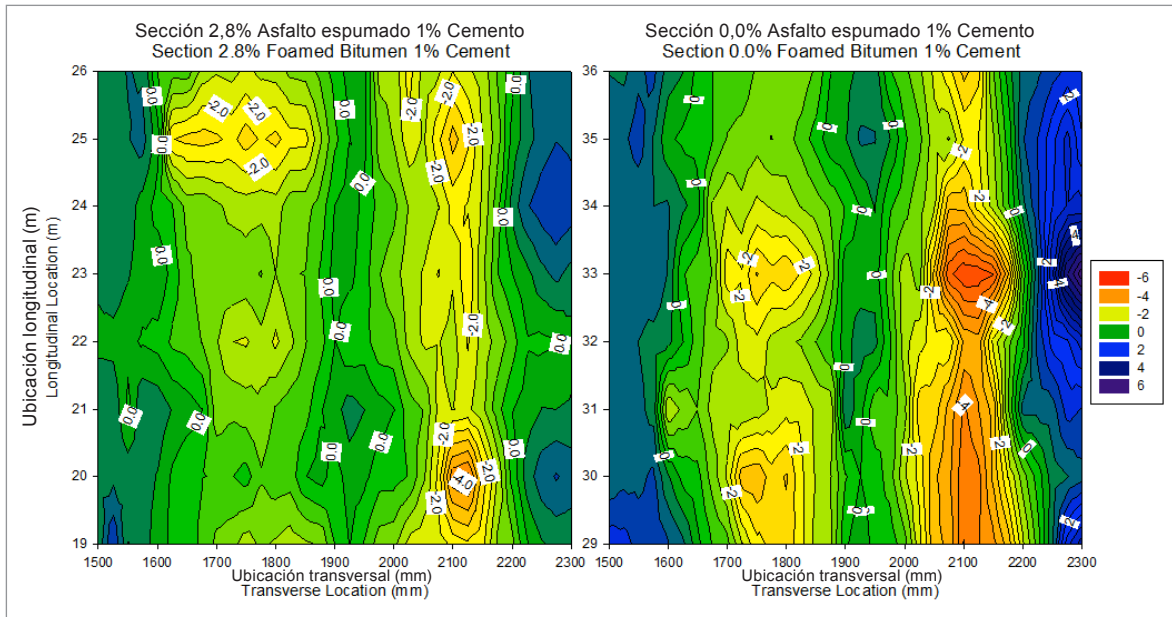


Figure 7. Vertical surface deformation contour plots of sections B28C10 (left) and B00C10 (right) after 500,000 load cycles

Figura 7. Deformación vertical de la superficie; trazados de curvas de secciones B28C10 (izquierda) y B00C10 (derecha) después de 500.000 ciclos de carga

**Modelamiento del Ahuellamiento**

Huurman (1997) propuso cuatro parámetros en un modelo (Ecuación 1) para describir el desarrollo de la deformación permanente en pavimentos granulares sometidos a tráfico. El modelo fue adaptado para describir el desarrollo del ahuellamiento en lugar de la deformación permanente. El modelo tiene la siguiente forma:

**Rutting modeling of stable and unstable behavior**

Huurman (1997), proposed a four parameters model (Equation 1) to describe the permanent strain development in unbound granular pavements under traffic. The model was adapted to describe the rutting development instead of the permanent strain. The four parameters model has the following form:

$$\text{Ahuellamiento/Rutting} = A * \left( \frac{N}{1000} \right)^B + C \left( e^{\frac{D_x * N}{1000}} - 1 \right) \quad (1)$$

Donde el ahuellamiento es expresado en mm, N es el número de ejes estándares equivalentes de 80 kN y A, B, C y D son los parámetros. El primer término del modelo describe el aumento lineal del ahuellamiento. El segundo término del modelo describe el comportamiento inestable, observado después de 1.000.000 de ciclos de carga, que no puede ser descrito por el primer término solamente, porque se observa un incremento exponencial en lugar de lineal del ahuellamiento. Las cargas vehiculares de 40 kN, 50 kN y 60 kN aplicadas durante el experimento, fueron convertidas a Ejes Estándares Equivalentes (ESA) de 80 kN, asumiendo la ley de exponente cuatro. El modelo fue ajustado al ahuellamiento medido a  $3 \times 10^5$  ciclos de carga ( $5,16 \times 10^5$  ESAs),  $5 \times 10^5$  ciclos de carga ( $1,528 \times 10^6$  ESAs),  $7 \times 10^5$  ciclos de carga ( $2,541 \times 10^6$  ESAs),  $1 \times 10^6$  ciclos de carga ( $4,059 \times 10^6$  ESAs) y  $1,326 \times 10^6$  ciclos de carga ( $5,710 \times 10^6$  ESAs). Para el ajuste del modelo se empleó la raíz cuadrada media (RMS):

$$RMS = \left( \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left( \frac{d_c - d_{mi}}{d_{mi}} \right)^2 \right) \times 100 \quad (2)$$

Donde N es el número de puntos de datos,  $d_c$  es la profundidad calculada del ahuellamiento y  $d_{mi}$  es el promedio medido del ahuellamiento. Los parámetros A, B, C y D fueron modificados empleando una herramienta de optimización para que la raíz cuadrada media fuera minimizada. Los resultados del ajuste del modelo son presentados en la TABLA 1 (parte superior).

Where Rutting is expressed in mm, N is the number of equivalent standard axles of 80 kN and A, B, C and D are the model parameters. The first term of the model describes the linear increase of rutting with N on a  $\log(\text{Rutting})-\log(N)$  scale. The second term of the model describes the unstable behavior observed after 1,000,000 load cycles that cannot be described by the first term alone, because an exponential instead of a linear increase of rutting with N on the same  $\log(\text{Rutting})-\log(N)$  scales is observed. The vehicle loads of 40 kN, 50 kN and 60 kN applied during the experiment were converted to Equivalent Standard Axles (ESAs) of 80 kN assuming a fourth power law. The model was fitted to the rutting measured at  $3 \times 10^5$  load cycles ( $5.16 \times 10^5$  ESAs),  $5 \times 10^5$  load cycles ( $1.528 \times 10^6$  ESAs),  $7 \times 10^5$  load cycles ( $2.541 \times 10^6$  ESAs),  $1 \times 10^6$  load cycles ( $4.059 \times 10^6$  ESAs) and  $1.326 \times 10^6$  load cycles ( $5.710 \times 10^6$  ESAs). For the model fitting the root mean square (RMS) was used:

Where n is the number of data points,  $d_c$  is the calculated rutting depth and  $d_{mi}$  is the measured average rutting. The parameters A, B, C and D were modified using an optimization tool so that the RMS was minimized. Results of the model fitting are shown in Table 1 (top).

**Table 1.** Results of model fitting  
**Tabla 1.** Resultados del ajuste del modelo

<b>4 parameters rutting model/ 4 parámetros del modelo de ahuellamiento</b>						
	<b>B12C10</b>	<b>B14C10</b>	<b>B28C10</b>	<b>B00C10</b>	<b>B00C00</b>	<b>B22C00</b>
A	3.4	3.7	3.7	4.8	9.0	6.8
B	0.17	0.11	0.08	0.17	0.09	0.14
C	$5.0 \times 10^{-5}$	$5.0 \times 10^{-5}$	$5.0 \times 10^{-5}$	$5.0 \times 10^{-5}$	$5.0 \times 10^{-5}$	$5.0 \times 10^{-5}$
D	1.90	1.88	1.95	2.10	1.99	2.10
RMS	3.1%	1.9%	6.2%	3.8%	1.7%	2.9%
<b>2 parameters rutting model/ 2 parámetros del modelo de ahuellamiento</b>						
	<b>B12C10</b>	<b>B14C10</b>	<b>B28C10</b>	<b>B00C10</b>	<b>B00C00</b>	<b>B22C00</b>
A	3.4	3.7	3.7	4.8	9.0	6.8
B	0.17	0.11	0.08	0.17	0.09	0.14
RMS	2.7%	1.3%	8.5%	4.6%	1.4%	3.8%

### Modelamiento del Ahuellamiento con Comportamiento Estable

En la última fase del experimento, se aplicó una carga relativamente alta de 60 kN. Este nivel de carga fue aplicado para acelerar el daño en los pavimentos y ver una diferencia más clara en el desempeño de las secciones de pavimentos.

### Rutting Modeling of Stable Behavior

In the last phase of the experiment a relatively high load of 60 kN was applied. This load level was applied to accelerate the damage of the pavements and to see a clearer difference in the performance of the pavement sections.

Puesto que los 60 kN exceden el límite legal de Nueva Zelanda y podría haber causado el deterioro acelerado observado en las secciones de pavimentos al final de la prueba; el mismo modelo de Hurman (1997) con el primer término sólo fue empleado para describir la fase estable del ahuellamiento (es decir hasta  $1 \times 10^6$  ciclos de carga). El ajuste del modelo a modelo de dos parámetros se muestra en la Tabla 1 (parte inferior).

Las ecuaciones con dos parámetros fueron usadas para extrapolar las mediciones de ahuellamiento hasta  $25 \times 10^6$  ESAs, asumiendo que los pavimentos se comportarán de manera estable dentro de esa cantidad de cargas cíclicas. Los resultados del modelamiento con dos parámetros fueron empleados para extrapolar las mediciones observadas, asumiendo un comportamiento estable de las secciones de pavimento. La extrapolación (Figura 8) muestra que las secciones B28C10 y B14C10 tendrían el menor ahuellamiento mientras que la sección B12C10 mostraría el mayor ahuellamiento dentro de las secciones estabilizadas con asfalto espumado más 1% de cemento, lo que es consistente con el desempeño observado cuando se introdujo agua a estas secciones de pavimento.

Since the 60 kN exceeds the legal limit and could have caused the observed accelerated deterioration of the pavement sections at the end of the test, the same Hurman (1997), model with the first term only was used to describe the stable phase of the rutting (i.e. up to  $1 \times 10^6$  load cycles). The model fitting of the two-parameter model is shown in Table 1 (bottom).

The two-parameter equations were used to extrapolate the rutting measurements up to  $25 \times 10^6$  ESAs assuming that pavements will perform in a stable condition within this number of load cycles. Results of the two-parameter modeling were used to extrapolate the observed measurements assuming stable behaviour of the pavement sections. The extrapolation (Figure 8) shows that sections B28C10 and B14C10 would have the lowest rutting while section B12C10 would show the highest rutting among the sections stabilised with foamed bitumen plus 1% cement, which is consistent with the performance observed when water was introduced in these pavement sections.

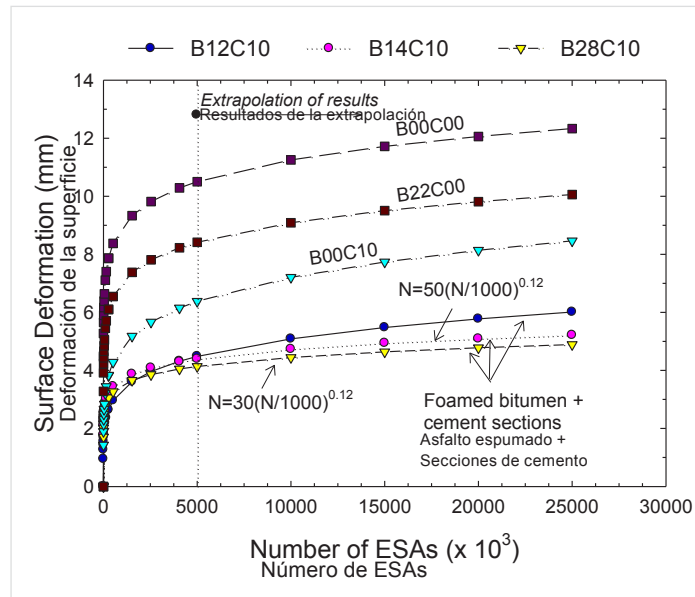


Figure 8. Extrapolation of rutting measurements using the two-parameter model up to  $25 \times 10^6$  ESAs

Figura 8. Extrapolación de las mediciones de ahuellamiento usando el modelo con dos parámetros hasta  $25 \times 10^6$  ESAs.

## 4. Conclusiones

En este artículo se presentó un experimento a escala real y carga acelerada en pavimentos de asfalto espumado. Los resultados del experimento llevan a las siguientes conclusiones:

- El ahuellamiento medido en secciones con asfalto espumado más un 1% de cemento fue el menor, demostrando que la adición de asfalto espumado mejoró en forma significativa el desempeño de los pavimentos.
- Las secciones B00C10, B22C00 y la sección de control no tratada (B00C00) presentaron grandes cantidades de ahuellamiento y deformación vertical.

## 4. Conclusions

A full-scale accelerated testing on foamed bitumen pavements was presented in this paper. Results from the full-scale study lead to the following findings:

- The rutting measured in the sections with foamed bitumen plus 1% cement was the lowest, showing that the addition of foamed bitumen significantly improved the performance of the pavements.
- The sections B00C10 and B22C00 and the control untreated section (B00C00) showed large amounts of rutting and heaving.

- Las deflexiones de la sección B28C10 fueron menores que las de otras secciones, mientras que la sección no tratada (B00C00) presentó los valores más altos.
  - Para diferenciar el desempeño del ahuellamiento en las secciones estabilizadas con asfalto espumado y cemento, se introdujo agua a través de cortes en la superficie. Luego de aplicar carga acelerada de tráfico, la sección B12C10 comenzó a presentar agrietamientos, mientras las secciones B14C10 y B28C10 se comportaron adecuadamente.
  - Dos tipos de modelos fueron ajustados para la medición de ahuellamiento. El primer modelo describió ahuellamiento estable e inestable en las secciones de pavimento; el segundo modelo solo consideró la fase estable donde se observa un aumento constante de ahuellamiento, con el número de cargas cíclicas.
  - Los modelos desarrollados y una mejor comprensión del desempeño de los pavimentos con asfalto espumado conducen a una programación más exacta de los tratamientos o mantención de pavimentos.
- *The deflections of section B28C10 were lower than those of the other sections, while the untreated section (B00C00) showed the largest values.*
  - *To differentiate the rutting performance of the sections stabilized with foam bitumen and cement, water was introduced through surface cuts. After the application of additional accelerated traffic load, section B12C10 started to show surface cracking, while sections B14C10 and B28C10 performed well.*
  - *Two types of models were fitted to the rutting measurements. The first model described the stable and unstable rutting of the pavement sections while second model only considered the stable phase in where a steady increase in rutting with the number of cycles is observed.*
  - *The developed models and the better understanding of the performance of foamed bitumen pavements leads to more accurate programming of treatments or maintenance of pavements.*

## 5. Agradecimientos

Los autores agradecen a las Agencias de Transporte de Nueva Zelanda, al Departamento de Ingeniería Civil y Recursos Naturales de la Universidad de Canterbury, a la empresa constructora Fulton Hogan y al Grupo de Estabilización de Nueva Zelanda.

## 5. Acknowledgments

*The authors extend their gratitude to: Land Transport New Zealand, New Zealand Transport Agency, the Civil and Natural Resources Engineering Department of Canterbury University, Fulton Hogan and the NZ Stabilisation Group.*

## 6. Referencias/ References

- Asphalt Academy (2002)**, Interim Technical Guidelines (TG2): The Design and Use of Foamed Bitumen Treated Materials. Asphalt Academy, Pretoria.
- ASTM Standard D4318 (2005)**, "Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils" ASTM international, West Conshohocken, PA, 2003, DOI: 10.1520/D4318-05E01.
- Austroads (2005)**, Pavement Design: A Guide to the Structural Design of Road Pavements. New Zealand Supplement.
- Dawson A. (1994)**, The E-mu System. Users Manual, 2nd ed. University of Nottingham, United Kingdom.
- Gonzalez A., Cubrinovski M., Pidwerbesky B. and Alabaster D. (2004)**, "Full scale experiment on foam bitumen pavements in CAPTIF accelerated testing facility". Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, Washington, D.C., pp. 21-29.
- Hurman M. (1997)**, Permanent Deformation in Concrete Block Pavements, PhD Thesis, Delft University of Technology.
- Jenkins K.J. (1994)**, Analysis of a Pavement Layer which has been Treated by Single Pass In Situ Stabilisation. University of Natal, South Africa.
- NZS. (1986)**, "NZS 4402.4.1.3:1986:Determination of the dry density/water content relationship - Test 4.1.3 New Zealand vibrating hammer compaction test." Standards New Zealand, Wellington.
- Saleh, M. F. (2004a)**, "Detailed Experimental Investigation for Foamed Bitumen Stabilisation.", University of Canterbury, Christchurch
- Thenoux G., Gonzalez A., and Dowling R. (2006)**, Energy Consumption Comparison for Different Asphalt Pavements Rehabilitation Techniques Used in Chile. Resources, Conservation and Recycling, 16 pp.