

# Rehabilitación de pavimentos de hormigón empleando la técnica de trituración/fracturación (rubblizing). Evaluación capacidad estructural

## *Bearing capacity evaluation of rubblized concrete pavements*

G. Thenoux<sup>(\*)</sup> y M. González<sup>(\*\*)</sup>

Recepción/Received: 13-VII-06  
Aceptación/Accepted: 27-XII-07  
Publicado online/Online publishing: 2-III-09

### RESUMEN

El trabajo presenta los resultados de un estudio a escala real de la capacidad estructural de un firme de hormigón rehabilitado utilizando la técnica de Rubblizing. La técnica de Rubblizing ha sido traducida como el pulverizado del firme de hormigón pero, es más bien un efecto combinado de trituración y fracturación de la losa de hormigón en todo su espesor para convertir esta en una base granular de alto módulo. Esta técnica fractura la losa de hormigón en trozos angulares y entrelazados empleando una carga dinámica concentrada, de baja amplitud y alta frecuencia. La investigación se basó en el estudio de la rehabilitación de 5 km de autopista. Los estudios de la capacidad estructural fueron realizados durante, al término y un año después de la construcción. Para las mediciones y evaluaciones de terreno se utilizó, el DCP, Deflectómetro de Impacto Liviano, FWD (sobre carpeta asfáltica) y excavando calcatas bajo el material triturado. La capacidad estructural del material triturado se realizó a través de un análisis teórico. Debido a las características anisotrópicas del material triturado, los resultados son presentados utilizando el coeficiente estructural AASHTO. Los resultados del estudio permiten recomendar un rango para el coeficiente estructural del pavimento sometido al proceso de Rubblizing el cual para espesores de losa superior a 22 cm está entre 0,25 a 0,30.

**Palabras clave:** Rubblizing, rehabilitación y reciclado de firmes de hormigón, trituración y fracturación de losas.

### SUMMARY

*The paper presents the findings of a research work performed on a real scale concrete pavement project where Rubblizing technology was used for its structural rehabilitation. Rubblizing may be defined as a fracture technique in which a concrete pavement slab is transformed in a granular base with a very high Modulus. This technique, fractures the concrete slab in angular pieces by using a concentrated dynamic load of low amplitude and high frequency. The research work was based on field study on the rehabilitation of 5 km motorway. The structural evaluations were made, before, during and after one year construction. Measurements and site evaluation were made by using DCP, Light Weight Deflectometer and FWD (on top of asphalt layer) and excavating inside pits. The structural capacity of the Rubblized layer was evaluated through theoretical analysis. Because of the anisotropic properties of the Rubblized layer the results are presented using AASHTO structural layer coefficient. The structural layer coefficients recommended are between the range of 0.25 and 0.30 for concrete slabs with thickness greater than 220 mm.*

**Keywords:** Rubblizing, concrete pavement rehabilitations and recycling, fracturing slabs.

(\*) Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.

(\*\*) Centro de Ingeniería e Investigación Vial, DICTUC S.A.

## 1. INTRODUCCIÓN

En Chile, el porcentaje de firmes de hormigón con respecto a firmes de asfalto es relativamente alto cuando se le compara con otros países a nivel mundial (25-30%), este hecho permite que se tenga una amplia experiencia en el diseño, construcción y mantenimiento de firmes de hormigón. Sin embargo, cuando se trata de llevar cabo proyectos de rehabilitación estructural de estos firmes principalmente se utiliza el refuerzo directo con mezcla bituminosa (1) y no se ha experimentado con otras técnicas constructivas. La técnica de refuerzo directo con mezcla bituminosa de un firme de hormigón deteriorado presenta ventajas constructivas y económicas principalmente por su rapidez, sin embargo, el refuerzo directo con mezcla bituminosa no es efectivo para controlar el reflejo de grietas por lo cual parte del problema que da origen a la utilización de un refuerzo de este tipo, se repite y, en algunos casos, desmejora la situación original. Para controlar el reflejo de grietas se consideran dos técnicas alternativas; la primera considera el uso de una capa de mezcla bituminosa intermedia de graduación abierta de 8 cm de espesor y la segunda considera la colocación de una capa granular intermedia de CBR 80% y 25 a 30 cm de espesor. La principal desventaja de estas dos técnicas que emplean capas intermedias más la capa de rodado estructural está en el hecho de que la doble capa de refuerzo eleva la cota de la rasante significativamente (entre 13 hasta 50 cm), alterando la funcionalidad de la sección transversal del camino o calle. Otra forma de controlar la propagación de grietas es la utilización de dos capas de mezcla bituminosa con el empleo de una geogrilla intermedia. Esta última técnica resulta exitosa principalmente cuando las losas agrietadas se encuentran sobre una sub-rasante muy estable y en áreas que no presenten problemas de drenaje. Sin embargo, aun así las grietas se reflejarán una vez que las capas asfálticas alcancen un grado de envejecimiento o rigidez, lo cual puede ocurrir en un periodo menor a 4 años. Existen aún otras formas de controlar el reflejo de grietas y éstas consideran la rotura parcial y asentamiento de losas. La reducción las losas puede llegar hasta tamaños de 30 por 30 centímetros, y, de este modo, reducir el movimiento relativo entre pedazos de losas contiguos reduciendo la probabilidad de la formación y propagación de grietas. Estas técnicas resultan extremadamente destructivas ya que para conseguir la energía de rotura se emplean grandes pesos los cuales se dejan caer de alturas de 1 m, pudiendo extender la destrucción a las capas inferiores o estructuras laterales del firme. Entre estas técnicas de rotura, se encuentra la rotura por guillotina (Guillotine Breaker) (2) y la rotura por martillos múltiples alternados (Multi Head Breaker) (2).

Dentro de las técnicas que emplean el concepto de reducir el tamaño de los bloques de hormigón se encuentra la técnica de Rubblizing (triturado/fracturado del firme de hormigón), la cual funciona con un principio muy diferente a los sistemas de rotura por caída libre. La técnica

## 1. INTRODUCTION

*In Chile, where concrete roads and streets are relatively common (25–30 % of the area paved with asphalt), considerable experience has been acquired in the design, construction and maintenance of concrete pavement. The structural rehabilitation of such pavement generally consists in direct reinforcement with hot mix asphalt (HMA) overlays (1) and no experimental research has been conducted on other construction techniques. Direct HMA overlay reinforcement of deteriorated concrete pavement has constructional and economic advantages, primarily relating to the speed of the operations. Since reflective cracking is not effectively prevented by this technique, however, the cause of the deterioration may re-appear, ultimately worsening the initial situation in some cases. Two alternative methods may be used to prevent reflective cracking: the first involves the use of an eight-cm intermediate layer of open-graded HMA and the second, the pouring of a 25-30-cm intermediate aggregate layer with a CBR of 80%. The chief drawback to this approach, namely the use of intermediate layers in addition to the structural wearing course, is that the double layer of reinforcement raises the grade level significantly (by 13 to 50 cm), altering the functionality of the cross-section of the road or street. Another way to control crack propagation is to use two layers of HMA in conjunction with an intermediate geogrid. This third technique is effective primarily when the cracked concrete lays on a very stable sub-grade in areas with no drainage problems. Even then, however, the cracks upwell in asphalt of a given age or stiffness, which may be reached in less than four years. Reflective cracking may also be prevented by partial breaking and subsequent settlement of the concrete slabs. The concrete may be broken up into 30 x 30-cm pieces to reduce the relative movement between adjacent slabs and with it the likelihood of crack formation and propagation. Such techniques are extremely destructive. The energy needed to break the slabs is obtained by dropping very heavy weights from a height of 1 m, whose impact may also destroy the under layers or pavement side structures. Two such breaking methods are the guillotine breaker (2) and the multi-head breaker (2).*

*Another method used to reduce the size of concrete blocks is known as rubblizing, which is based on a very different principle from free-fall breakage systems. In rubblizing, highly concentrated, very low amplitude, high frequency energy is applied to the*

de Rubblizing aplica una energía concentrada de muy baja amplitud y alta frecuencia, la cual genera una grieta puntual que luego se propaga en todo el espesor del firme de hormigón (3). Esta técnica presenta innumerables ventajas ya que permite transformar el firme de hormigón en una base granular de alto módulo elástico y, de este modo, crear una nueva plataforma sobre la cual se construye directamente una superficie de rodado de asfalto. Con esta técnica se logra optimizar el espesor de refuerzo de mezcla bituminosa sin el riesgo de reflejo de grietas (4).

En el año 2005/2006, se realizó la primera experiencia en Chile de rehabilitación de un firme de hormigón empleando la tecnología de Rubblizing. El proyecto consistió en la extensión de 5 km de una autopista en la zona central de Chile, diseñada para más de 80 millones de Ejes Equivalentes (Autopista del Sol, Nuevo Acceso al Puerto San Antonio). Este proyecto permitió llevar a cabo una importante parte de la investigación y realizar una serie de comprobaciones teóricas, ensayos, evaluaciones técnicas y seguimiento que permitieron evaluar la capacidad estructural remanente de la capa de hormigón triturado/fracturado. El estudio de la capacidad estructural de una losa que ha sido sometida al proceso de Rubblizing resulta necesario debido a que en el proceso de diseño de espesores de refuerzo se requiere asignar un valor estructural a la losa triturada/fracturada. Sin embargo, debido a la forma en que la losa queda triturada y fracturada, sólo puede evaluarse su capacidad estructural remanente *in situ*.

## **2. PROCESO DE RUBBLIZING CON ROMPEDOR RESONANTE**

La técnica de Rubblizing con rompedor resonante se realiza con un equipo de diseño único que se presenta en la Figura 1(a). Estudios experimentales han determinado que el patrón de fractura es similar al presentado en la Figura 1(b), donde la porción superior del pavimento (5-8 cm) queda más triturada y la porción inferior queda fracturada y altamente trabada en un patrón de grietas de 35 a 45 grados. Este patrón de agrietamiento le confiere al material excelentes propiedades mecánicas de resistencia, pero debido a que lo convierte en un material anisotrópico la forma más recomendada para medir su capacidad estructural es directamente en sitio sin alterar la condición de terreno.

El producto final del Rubblizing es una capa granular de alta capacidad estructural, de excelente comportamiento frente al agua. Además, debido a que la energía de rotura se entrega con una baja amplitud y alta frecuencia, el poder destructivo de la carga dinámica se concentra en la porción del firme de hormigón no alterando las condiciones

*concrete, generating individual cracks that then propagate across the pavement from top to bottom (3). With this technique, the concrete pavement is converted into a highly elastic aggregate base on which the asphalt wearing course can be directly laid. Such an approach optimizes the thickness of the HMA reinforcement while eluding the risk of reflective cracking (4).*

*Rubblizing was used to rehabilitate concrete pavement in Chile for the first time in 2005/2006. The project consisted in a 5-km extension of a motorway in central Chile, designed to withstand over 80 million equivalent single axle loads (Autopista del Sol, new Puerto San Antonio access). This project provided the opportunity to conduct much the research and perform theoretical verifications, trials, technical assessments and follow-up testing to evaluate the bearing capacity of the rubblized concrete. Since rubblized slabs must be assigned a structural value to determine the thickness of the reinforcing overlay, their bearing capacity must be found prior to proceeding with remedial design. Due to the post-rubblizing condition of such slabs, however, their bearing capacity can only be assessed in situ.*

## **2. RUBBLIZING WITH A RESONANT FREQUENCY BREAKER**

*Resonant frequency breakers have a unique design, as shown in Figure 1(a). Experimental studies have shown that the fracture pattern is similar to the pattern pictured in Figure 1(b), where the top portion of the pavement (5-8 cm) is crushed, while the bottom portion is broken and highly compacted, with cracks slanting on a 35- to 45-degree angle. This cracking pattern affords the material high mechanical strength, but since it also generates anisotropies, the concrete bearing capacity is most effectively measured directly in situ, without altering terrain conditions.*

*The final product of rubblizing is an aggregate layer with a high bearing capacity and excellent drainage. Moreover, since the breaking energy is delivered at low amplitude and high frequency, the destructive power of the dynamic load is concentrated on the concrete portion of the pavement, without altering the existing road base or*

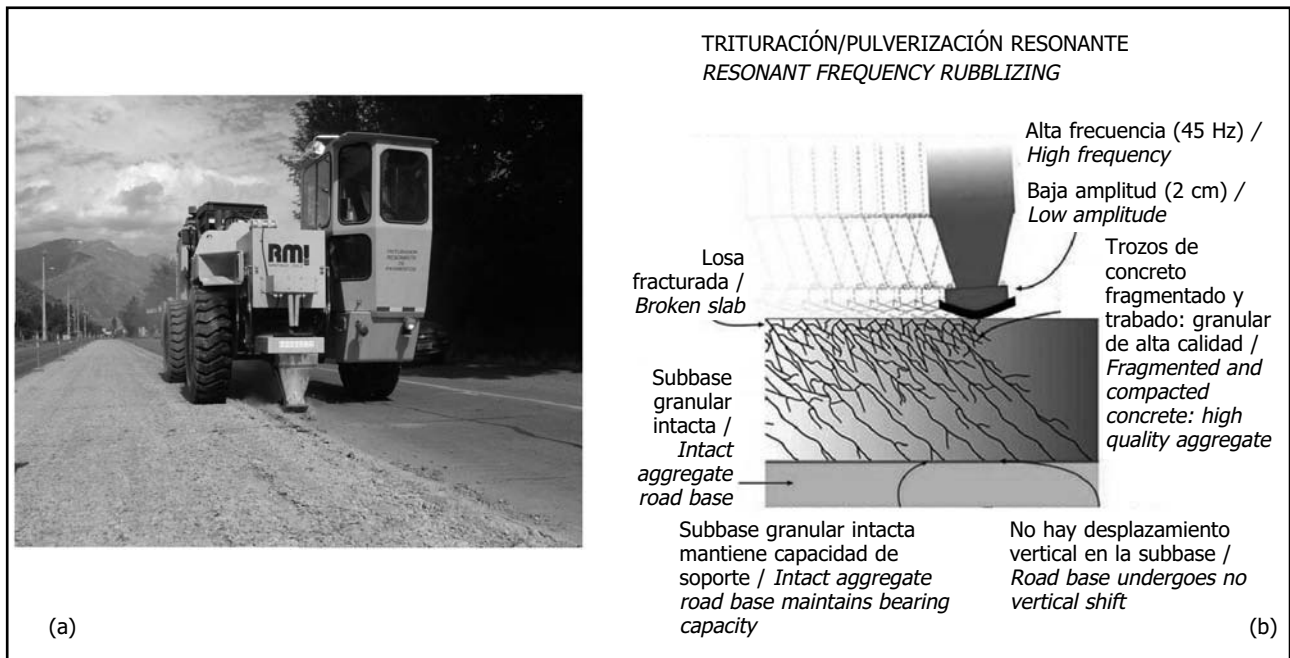


Figura 1. Equipo rompedor resonante (a) y patrón de fractura del hormigón pulverizado (b).  
 Figure 1. Resonant frequency breaker (1) and fracture pattern in rubblized concrete (b).

de la subbase y la explanada existentes (3). Por esta última razón, la carga dinámica tampoco afecta a instalaciones bajo el firme. Sobre la capa triturada y fracturada, se construye una capa de rodadura de mezcla bituminosa, la cual no queda expuesta a un potencial reflejo de grietas, obteniéndose un firme de excelente capacidad estructural y de buen comportamiento a largo plazo (5).

La técnica de Rubblizing fue inventada en Estados Unidos y hasta el año 2007 se han realizado proyectos de rehabilitación en más de 20 estados desde la década del 80. La técnica es recomendada por la Nacional Asphalt Pavement Association (NAPA) (2), el Asphalt Institute (6) y el procedimiento de Diseño AASHTO 93 (7). Esta técnica también es considerada como una técnica de reciclado en sitio del firme de hormigón debido a que permite la reutilización integral del firme sin removerlo de su sitio. La técnica en este sentido se compara con las técnicas de reciclado en sitio de firmes asfálticos en donde el pavimento es transformado en una base estructural de alta calidad para luego construir sobre ésta una nueva capa de rodado (8).

### 3. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO Y METODOLOGÍA DE ESTUDIO

El proyecto a rehabilitar correspondió a la extensión de 5 km de la Autopista del Sol en la zona central de Chile. El proyecto consideraba rehabilitar los dos carriles de la calzada existente (firme de hormigón) para acomodar el tránsito Oriente-Poniente y construir una nueva calzada

sub-grade. For this same reason, the services beneath the pavement are also unaffected by the dynamic load. HMA is overlaid on the rubblized concrete base. Since this new wearing course is not subject to potential reflective cracking, the resulting pavement exhibits excellent bearing capacity and high long-term performance (5).

Rubblizing was developed in the United States, where rehabilitation projects have been completed in over 20 states since the nineteen eighties. The technique is recommended by the National Asphalt Pavement Association (NAPA) (2), the Asphalt Institute (6) and AASHTO design procedure 93 (7). It is also regarded to be a recycling technique for concrete pavements, since it provides for full re-use with no need for removal of the material. In this respect, the method is comparable to in situ asphalt recycling techniques, where the pavement is converted into a high quality structural base over which the new wearing course is laid (8).

### 3. PROJECT DESCRIPTION AND METHODOLOGY

The rehabilitation project consisted in a 5-km extension of the Autopista del Sol, in central Chile. The project envisaged rehabilitating the existing two-lane (concrete pavement) carriageway to bear westbound traffic and building a new HMA carriageway for eastbound traffic.

de firme bituminoso para acomodar el tránsito Poniente-Oriente. El perfil transversal del proyecto para la calzada nueva y la calzada de hormigón a rehabilitar se muestra en Figura 2 (9).

The vertical cross-sections of the new and rehabilitated carriageways are shown in Figure 2 (9).

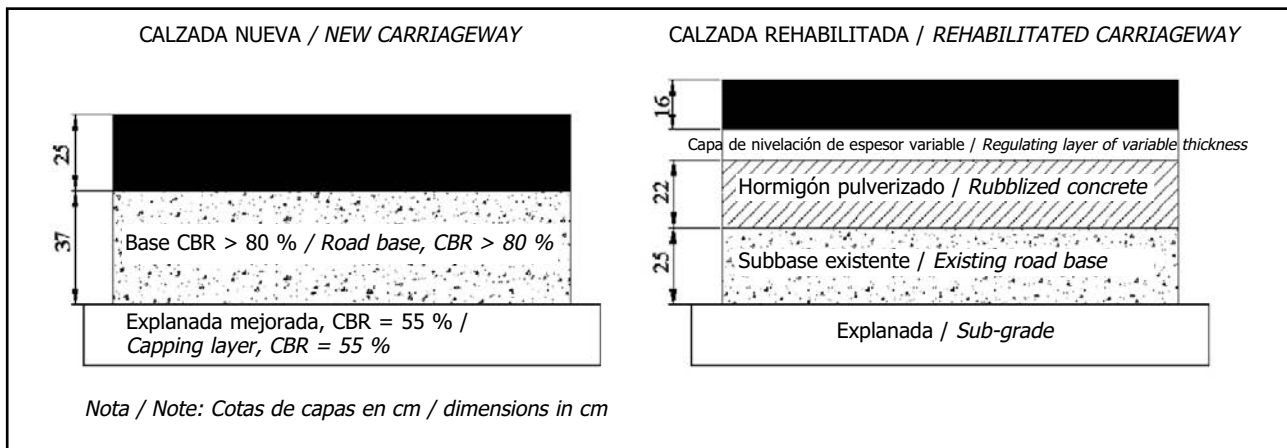


Figura 2. Estructuras de la calzada nueva y la calzada rehabilitada.  
 Figure 2. New and rehabilitated carriageway structures.

El firme bituminoso de la calzada nueva se diseñó en 3 capas: 5 cm de capa de rodadura con Estabilidad Marshall (EM) 9000 N, 10 cm de capa intermedia con EM 8000 N y 10 cm de base bituminosa con EM 6000 N. Las capas asfálticas se construyeron sobre una base granular de 37 cm CBR mayor a 80%. La explanada de la calzada nueva fue mejorada en un espesor de 90 cm con un material de CBR 55% (clasificación SM o A-1b(0)) a lo largo de todo el proyecto.

The HMA pavement on the new carriageway was designed to have three layers: a 5-cm wearing course with 9 000-N Marshall stability (MS); a 10-cm intermediate layer with 8 000-N MS; and a 10-cm HMA road base with a 6 000-N MS. These asphalt layers were laid on a 37-cm aggregate road base with a CBR of over 80%. In the new carriageway the sub-grade was improved along its entire length with a 90-cm capping layer having a CBR of 55% (SM or A-1b(0) classification).

La calzada rehabilitada se materializó empleando la técnica de Rubblizing en donde se trituró/fracturó el firme de hormigón de espesor medio de 22 cm. Sobre el firme de hormigón triturado/fracturado se construyeron dos capas bituminosas: 6 cm de rodadura con EM 9000 N y 10 cm de capa intermedia con EM 8000 N. El proyecto de ingeniería original consideró las recomendaciones internacionales para suponer el coeficiente estructural del Rubblizing. Se determinó un NE de proyecto igual a 14,56 cm (10). Para caracterizar el material triturado se utilizó un coeficiente estructural igual a 0,25. AASHTO recomienda un rango entre 0,14 y 0,30 (6) y la NAPA un rango entre 0,2 y 0,35 (2) dependiendo de la confiabilidad del proyecto, ambos rangos relativamente amplios por lo cual se requiere verificar su valor definitivo *in situ*. El proyecto requirió además la utilización de una capa asfáltica de nivelación de espesor variable (3 a 10 cm, EM 6000 N) para rectificar deformaciones del perfil longitudinal y sección transversal del pavimento. A pesar de existir zonas con severo deterioro como se presenta en la Figura 3, la alternativa del Rubblizing permitió reciclar el 100% del hormigón existente sin otro tipo de intervención adicional que el triturado/pulverizado.

The rehabilitated carriageway was built by rubblizing the concrete pavement, whose mean thickness was 22 cm. Two layers of HMA were set on the concrete pavement: a 6-cm wearing course with 9 000-N MS and a 10-cm intermediate course with 8 000-N MS. The original engineering design assumed the internationally recommended structural coefficient for the rubblized concrete. A design SN of 14.56 cm was found (10). The structural coefficient used to characterize the rubblized material was 0,25. AASHTO recommends a range of 0.14 to 0.30 (6) and NAPA from 0.2 to 0.35 (2) depending on design confidence levels. Since both ranges are fairly broad, the final figure must be verified *in situ*. The design also called for an asphalt-base regulating course of variable thickness (3 to 10 cm, MS 6 000 N) to rectify deformations in the pavement's longitudinal and vertical cross-sections. Despite the existence of severely deteriorated areas such as shown in Figure 3, with the rubblizing alternative, 100% of the existing concrete could be recycled with no need for any further action.



Figura 3. Sector del proyecto con severo nivel de agrietamiento.  
*Figure 3. Severely cracked length of road.*

Se realizaron una serie de estudios de ingeniería previos a la ejecución del Rubblizing para medir aquellos parámetros que podrían introducir variabilidad en los resultados de la investigación. La metodología consideró los siguientes estudios previos (9):

- Evaluación y diagnóstico de las fallas que presentaba el firme de hormigón con el fin de detectar aquellas zonas en donde las fallas podrían estar asociadas a un colapso de la sub-rasante (o suelo de fundación) o problemas de drenaje. Básicamente se identificaron dos sectores con problemas de drenaje los cuales fueron rectificadas en el nuevo proyecto de ingeniería.
- Toma de testigos cilíndricos del firme de hormigón para verificar espesores del firme de hormigón. El espesor original de diseño era 22 cm, pero se identificaron sectores puntuales con espesores de 21 hasta 27 cm.
- Se realizó un estudio del subsuelo en base a la excavación de calicatas en los bordes del firme y cono de penetración dinámica en todos los puntos que más tarde serían evaluados.

Después de realizado el proceso de Rubblizing se llevó a cabo un programa de ensayos de terreno empleando un Deflectómetro de Impacto Liviano (Light Falling Weight Deflectometer - LFWD) sobre el material recién triturado/pulverizado. Se realizaron dos tipos de mediciones con este equipo: la primera medición fue directamente sobre el material triturado/fracturado y la segunda medición se realizó sobre la sección de material fracturado, eliminando la parte superior de material triturado (5-8 cm). Las mediciones fueron determinadas con placa de 20 cm de diámetro.

Una vez terminado el proceso de Rubblizing se construyó la capa de rodado de mezcla bituminosa sobre la cual se realizó mediciones con Deflectómetro de Impacto (FWD) con un equipo Modelo Dynatest 8081. También se

*Prior to rubblizing, a series of engineering studies were conducted to measure the parameters that might introduce variability in the research results. These studies included (9):*

- *Evaluation and diagnosis of the flaws in the concrete pavement to detect areas that might be associated with sub-grade (or road foundation) collapse or drainage problems. Essentially two sections were found to have drainage problems, which were corrected in the new engineering design.*
- *Cylindrical core sampling of the concrete pavement to verify thickness. While the original design thickness was 22 cm, sections were occasionally found with thicknesses ranging from 21 to 27 cm.*
- *Sub-soil survey based on probes taken along the edges of the pavement and a cone drop test at all probe points, for subsequent evaluation.*

*Once rubblized, the material was tested in situ with a light falling weight deflectometer (LFWD). Two types of measurements were taken with this instrument: the first was directly on the material as rubblized and the second on the fractured portion exposed after the top 5-8 cm of crushed material was brushed away. The measurements were made with 20-cm diameter plates.*

*The HMA overlay was subsequently built and measured with a Dynatest 8081 falling weight deflectometer (FWD). Deflection measurements were also made on the new carriageway to compare the bearing capacity of the*

realizaron mediciones de deflexión en la calzada nueva. Esto último permitió comparar la capacidad estructural de ambas soluciones de pavimentos, las cuales serían sometidas al mismo tipo de tránsito. Las mediciones con FWD se realizaron al término de la construcción con las cargas de 30, 40 y 50 kN (año 2005) y posteriormente después de 12 meses en servicio (11).

#### 4. RESULTADOS Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS

##### 4.1. Resultados del estudio Deflectómetro Liviano (LFWD) sobre el pulverizado

El LFWD es un equipo portátil que permite medir el módulo de elasticidad de materiales granulares en forma directa. El LFWD está equipado con una célula de carga de precisión para medir la fuerza de impacto del peso de caída y con un geófono de precisión (sensor de velocidad sísmica). Se determinó el módulo de elasticidad con dos alturas de caída. Por cada altura de caída se realizaron tres golpes. El módulo de elasticidad representativo de cada altura de caída se determinó como el promedio de estas tres mediciones. Por lo tanto, el módulo de cada punto corresponde al promedio de las dos alturas de caída. Después, empleando las recomendaciones de Witczak [1] se determinó el coeficiente estructural de la capa pulverizada (12). Los resultados se presentan en la Figura 4.

$$a_{Rubb} = a_s \sqrt[3]{\frac{E_{Rubb}}{E_s}} = 0.0045 * \sqrt[3]{E_{Rubb}} \quad [1]$$

donde:

$a_{Rubb}$  = coeficiente estructural del material pulverizado (incógnita)  
 $a_s$  = coeficiente estructural de un material estándar (0,14)  
 $E_{Rubb}$  = módulo de elasticidad del material pulverizado obtenido por cálculo inverso multicapa  
 $E_s$  = módulo de elasticidad del material estándar (30 000 psi)

A partir de este análisis se obtuvo un valor de coeficiente estructural medio de 0,13. Sin embargo, tomado en consideración que el hormigón triturado/fracturado presenta una trabazón mayor en su parte inferior se realizaron mediciones sobre la sección de material fracturada, eliminando la parte superior de pulverizado (5-8 cm). Los resultados se presentan en la Figura 5. Esta vez el coeficiente estructural medio de la parte triturada resultó ser mayor ( $a_i = 0,16$ ).

*two types of pavements, which were to handle the same type of traffic. The FWD measurements were made with 30-, 40- and 50-kN loads (2005), both upon completion of the road and after it had been in service for 12 months (11).*

#### 4. RESULTS AND EVALUATION

##### 4.1. LFWD results

*The LFWD is a portable device for directly measuring the resilient modulus in granular materials. It is fitted with both a precision load cell for measuring the force of the impact of the falling weight and a precision geophone (seismic velocity sensor). Resilient modulus was calculated at two falling heights, with three impacts per height. The resilient modulus for each height was taken as the mean of the three measurements and the stress for each point was defined to be the mean of the two falling height values. The structural coefficient of the crushed layer was then determined as described by Witczak [1] (12). The results are shown in Figure 4.*

where:

$a_{Rubb}$  = structural coefficient of the crushed material  
 $a_s$  = structural coefficient of a standard material (0.14)  
 $E_{Rubb}$  = resilient modulus of the crushed material obtained by back-calculation  
 $E_s$  = resilient modulus of the standard material (30 000 psi)

*The mean structural coefficient found with the above procedure was 0,13. Given, however, that the rubblized concrete was more tightly compacted at the bottom than at the top of the slab, measurements were also taken on the fractured material after removing the upper layer (5-8 cm). As shown in the results in Figure 5, a larger mean structural coefficient ( $a_i = 0,16$ ) was found in this case.*

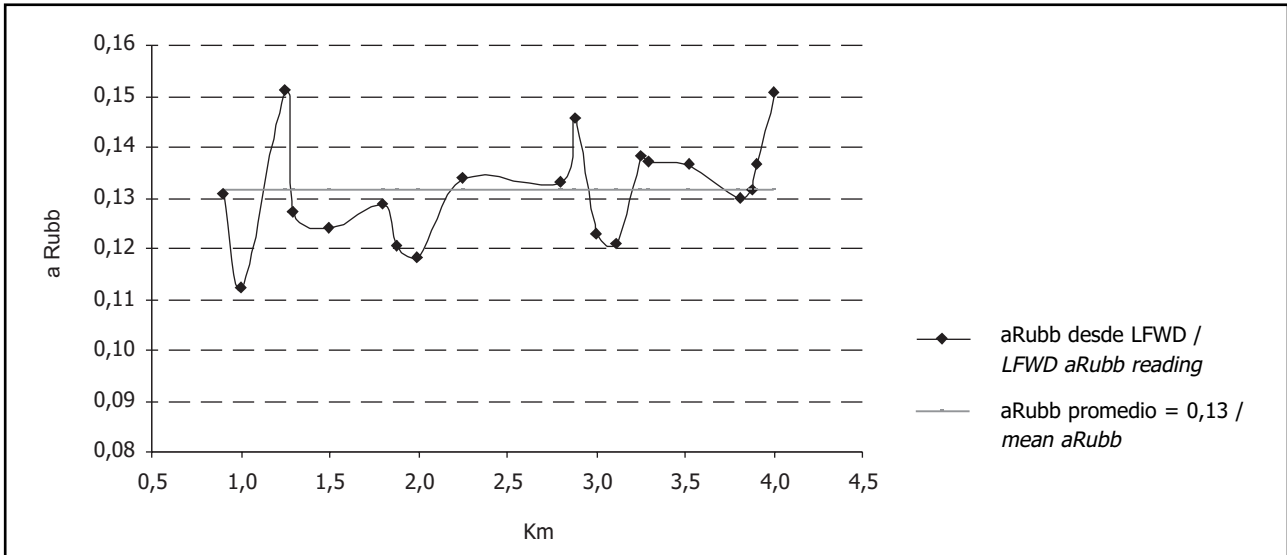


Figura 4. Coeficiente estructural del Rubblizing sobre pulverizado compactado con LFWD.  
 Figure 4. LFWD-measured structural coefficients of crushed layer in rubblized concrete.

Por un aspecto logístico de construcción las mediciones de los resultados presentados en la Figura 4 y 5 no están localizados en las mismas áreas, sin embargo, como se recogieron una serie de antecedentes del firme antes del proceso de Rubblizing se comprueba que la variación media de los resultados se debe principalmente a variaciones del espesor de la losa de hormigón.

For reasons of construction logistics, the measurements shown in Figure 5 were not taken in the same spot as the readings for Figure 4. Nonetheless, on the grounds of the pavement characteristics determined prior to rubblizing, the mean variation of the results was found to be due primarily to variations in concrete slab thickness.

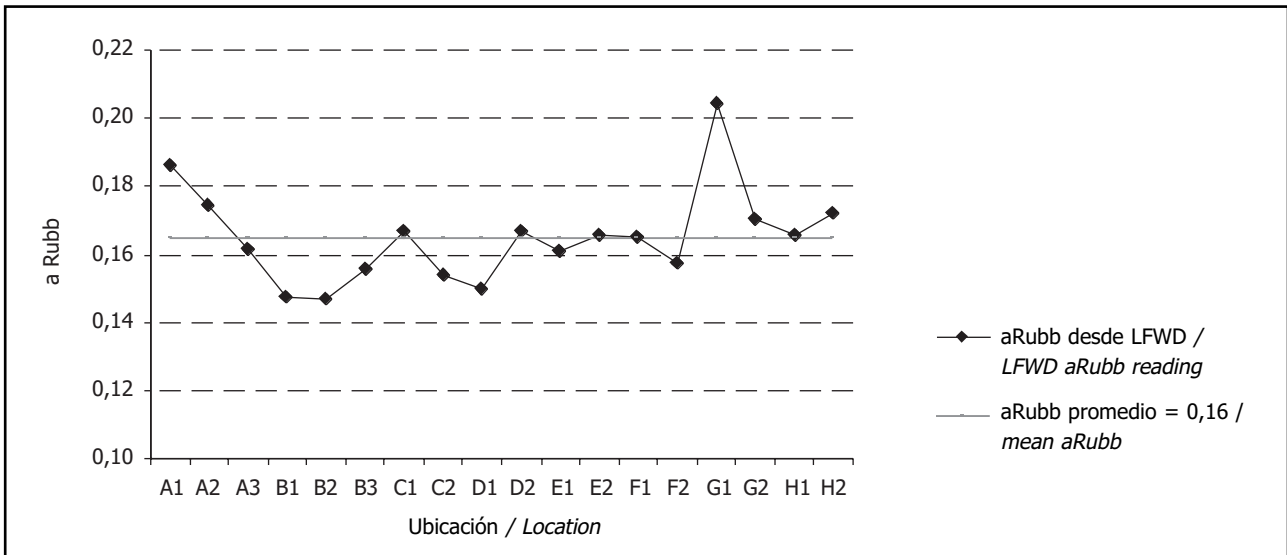


Figura 5. Coeficiente estructural Rubblizing en sección más fracturada con LFWD.  
 Figure 5. LFWD-measured structural coefficients in fractured layer of rubblized concrete.

**4.2. Resultados estudio deflectómetro liviano de impacto (FWD) sobre capa de rodado**

Una vez construida la capa de rodado con mezcla bituminosa sobre el firme triturado/fracturado se realizaron mediciones con FWD. No se realizaron mediciones con

**4.2 Falling weight deflectometer (FWD) results for overlay**

FWD measurements were also taken of the HMA overlay. FWD measurements were not taken directly on the rubblized concrete because the loose material on the surface



FWD directamente sobre el hormigón triturado/fracturado debido a que el material suelto en la superficie de la capa triturada distorsiona las lecturas de los geófonos (9). A partir de las mediciones con FWD se determinó el Número Estructural Efectivo (NE<sub>ef</sub>) utilizando el cálculo inverso AASHTO 1993 (6) según ecuación [2]. La Figura 6 presenta el NE<sub>ef</sub> de la calzada nueva y de la calzada rehabilitada con Rubblizing. La Figura también presenta el Número Estructural de diseño obtenido de la memoria de cálculo del proyecto de ingeniería para efecto de comparación.

layer would have distorted geophone readings (9). FWD measurements were used to determine the effective structural number (SN<sub>eff</sub>) via AASHTO 1993 back-calculation (6) as per equation [2]. Figure 6 shows the SN<sub>eff</sub> for the new and rehabilitated carriageways. The figure also gives the design structural number set out in the engineering memorandum for purposes of comparison.

$$NE_{ef} = 0.0045 \cdot D \sqrt[3]{E_p} \quad [2]$$

donde:

NE<sub>ef</sub> = número estructural efectivo (en pulgadas)  
 D = espesor de todas las capas sobre la explanada (en pulgadas)  
 E<sub>p</sub> = módulo efectivo del firme sobre la explanada (en psi)

where:

SN<sub>eff</sub> = effective structural number (in inches)  
 D = thickness of all layers above the sub-grade (in inches)  
 E<sub>p</sub> = effective pavement modulus over sub-grade (in psi)

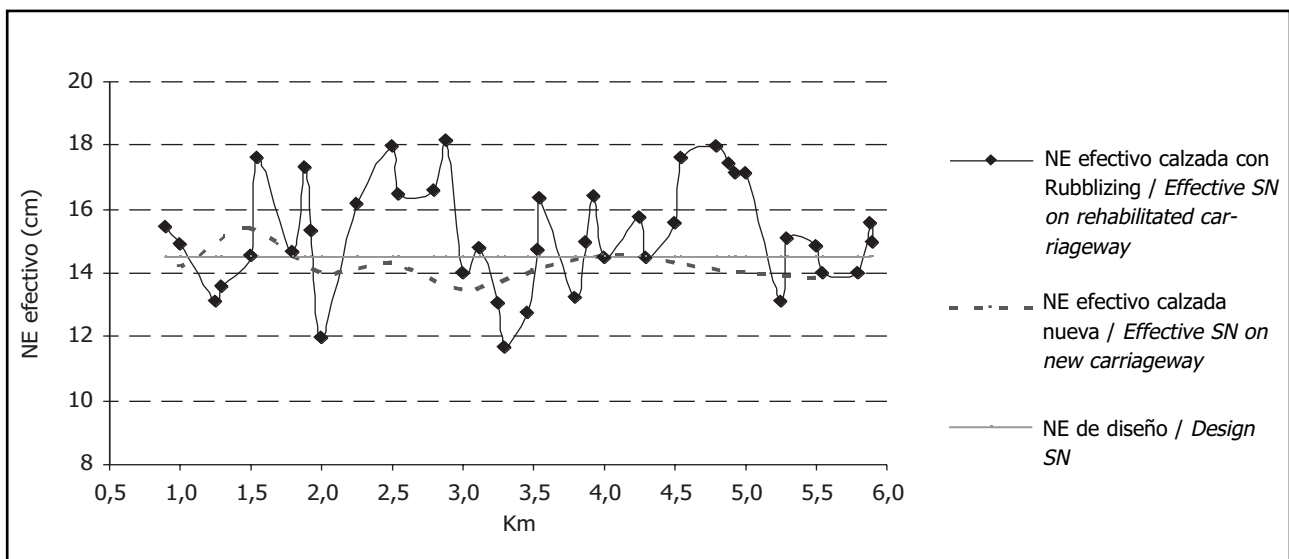


Figura 6. Números estructurales efectivos del proyecto.  
 Figure 6. Effective structural numbers used in the project.

Para determinar el coeficiente estructural del Rubblizing se utilizó la ecuación [1] planteada por Witczak. Para lo anterior, fue necesario determinar el módulo de elasticidad del Rubblizing para lo cual se utilizó el procedimiento de cálculo inverso multicapa del programa EVERCALC versión 5.11 para Windows. Como "test" de prueba para la aplicación del programa EVERCALC se realizó un cálculo inverso multicapa en el firme nuevo y se determinó para cada punto auscultado los módulos de elasticidad y coeficiente estructural de la base CBR > 80%. Los resultados para cada nivel de carga se presentan en la Figura 7. En

The structural coefficient of the rubblized layer was determined with Witczak's equation [1]. The resilient modulus value that must be substituted into equation [1] was found with EVERCALC 5.11 (for Windows) back-calculation software for pavement moduli. To test the software, back-calculation was performed on the new pavement to determine the resilient modulus and structural coefficient for each point of the CBR > 80% road base sounded. The results are shown in Figure 7. The mean structural coefficient obtained for the road base (a<sub>Base</sub>) was 0.14 for all load levels,

promedio se obtuvo para el coeficiente estructural de la base ( $a_{Base}$ ) un valor 0,14 para cada nivel de carga lo que es consistente para el tipo de estructuración del firme utilizado (13).

which is consistent with this type of pavement structure (13).

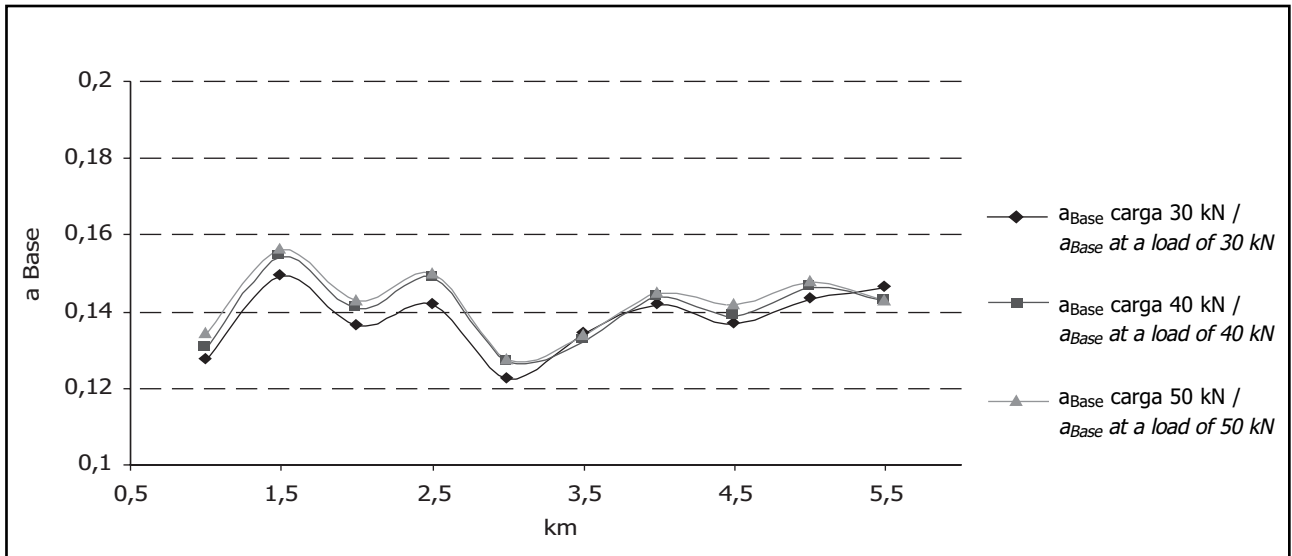


Figura 7. Coeficiente estructural de la base ( $a_{Base}$ ) firme nuevo.  
 Figure 7. Structural coefficient for the new pavement road base ( $a_{Base}$ ).

Una vez comprobada la consistencia del EVERCALC en el estudio de la calzada nueva se realizó el cálculo inverso multicapa en la calzada rehabilitada mediante Rubblizing para las mediciones del año 2005 y 2006.

Once the EVERCALC software had been verified for the new carriageway, back-calculation was performed for the 2005 and 2006 rubblized carriageway readings. The structural coefficient values obtained

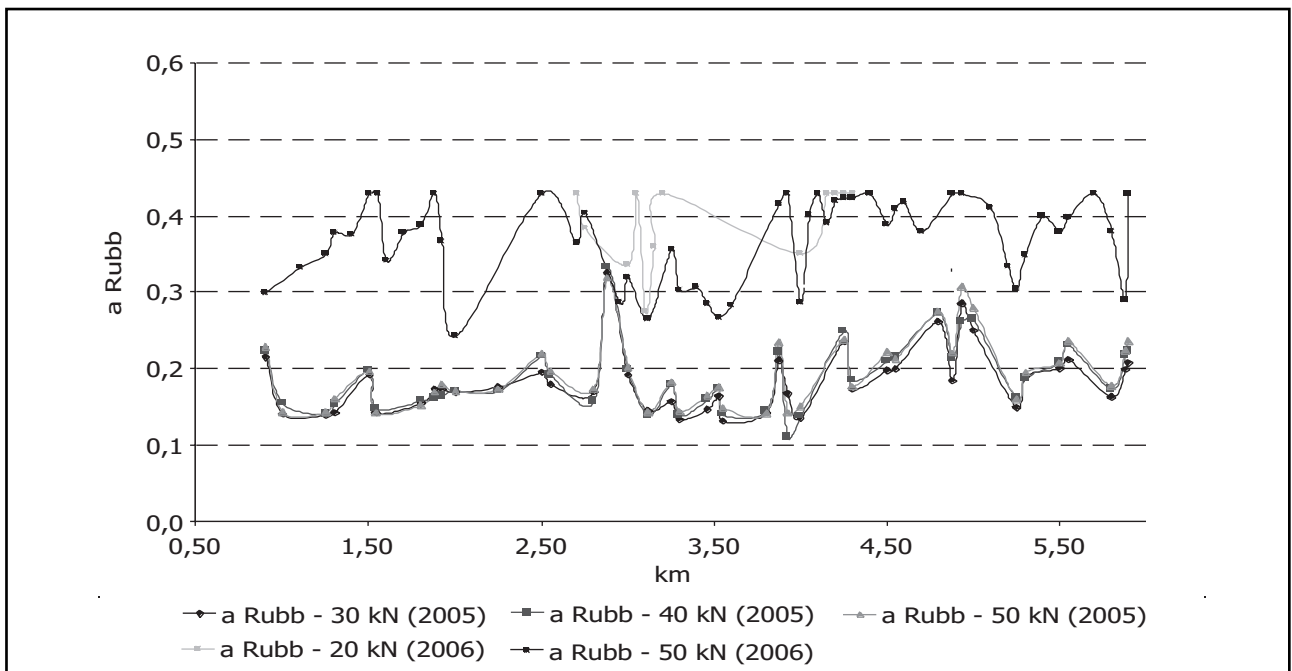


Figura 8. Coeficiente estructural de Rubblizing obtenido mediante cálculo inverso multicapa para diferentes niveles de carga, años 2005 y 2006.  
 Figure 8. Back-calculated structural coefficient for the rubblized layer at different load levels, 2005 and 2006.

Los valores obtenidos de coeficiente estructural para la capa sometida al proceso de Rubblizing se presentan en la Figura 8. El valor medio del coeficiente estructural para las mediciones realizadas previo a la puesta en servicio del proyecto es 0,19. El valor medio del coeficiente estructural para las mediciones realizadas un año después de la puesta en servicio del proyecto es de 0,35 (11).

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los Módulos del Rubblizing determinados con el LFWD presentaron un incremento al comparar el módulo medido en la parte superior del firme triturado/fracturado con el módulo del 2/3 inferior de la sección del firme. Esto se explica debido al patrón de fractura que produce el proceso de Rubblizing. En el proceso de Rubblizing, el martillo rompedor golpea directamente la superficie del pavimento produciendo una rotura más fina del tercio superior de la sección del firme (trituración), pero debido a que la carga es concentrada y aplicada con una muy baja amplitud y alta frecuencia permite que la trituración que ocurre en el tercio superior de la losa se propague en un ángulo de 35 a 45° hacia el interior del firme de hormigón. Este proceso deja una estructura altamente trabada la cual posee una resistencia mecánica equivalente a un material de alto módulo (en comparación con una base CBR  $\geq 80\%$ ).

Después del proceso de Rubblizing, la capa triturada se compacta y, posteriormente, se construye una carpeta superior de mezcla bituminosa. Tanto el proceso de compactación previo como el proceso de construcción y compactación de la capa de asfalto permiten que la estructura de hormigón triturada/fracturada se comporte como una sola estructura integral. Para verificar este efecto se realizaron las mediciones con FWD sobre la carpeta asfáltica, previo a la entrega de servicio del firme. A partir de las mediciones con FWD fue posible determinar el coeficiente estructural del Rubblizing. Para la primera medición (año 2005) se obtuvo un coeficiente estructural promedio de 0,19 para la carga de 50 kN. Con esta medida se comprueba el efecto de ajuste que ocurre con la capa de hormigón triturada/fracturada una vez construida la capa de rodadura de asfalto. Se estima que el proceso de ajuste de la capa triturada/fracturada continúa y a pesar de que los movimientos relativos entre los pedazos fracturados son imperceptibles, el pavimento sigue ganando resistencia, producto del paso del tránsito pesado. Para comprobar este último efecto se realizaron mediciones con FWD un año más tarde y se obtuvo un coeficiente estructural promedio de 0,35 para la carga de 50 kN, lo que demuestra un importante incremento de la propiedad en el primer año de servicio. La variabilidad en los resultados con FWD, tanto para las

*for the rubblized layer are given in Figure 8. The mean structural coefficient obtained prior to commissioning was 0.19. The mean structural coefficient obtained one year after commissioning was 0.35 (11).*

## 5. ANALYSIS OF RESULTS

*The LFWD resilient moduli readings were higher in the top 1/3 than in the lower 2/3 of the rubblized pavement. This can be explained by the fracture pattern resulting from rubblizing. When the breaker head strikes the surface of the pavement, the concrete breaks into smaller pieces in the upper third than in the rest of the pavement (crushing), but since the load is concentrated and applied at a low amplitude and high frequency, crushing propagates to the rest of the concrete pavement in the form of cracks slanted at an angle of 35 to 45 degrees. This process yields a very compact structure with mechanical strength equivalent to a high modulus material (compared to a road base with a CBR  $\geq 80\%$ ).*

*In the present study, after rubblizing, the upper layer was consolidated and covered with an HMA overlay. As a result of such prior consolidation and the laying and consolidation of the HMA, the rubblized concrete behaved like a single integrated structure. This effect was verified by taking FWD readings on the asphalt overlay before commissioning the pavement. These measurements were used to find the structural coefficient of the rubblized concrete. The first reading (2005) gave a mean structural coefficient of 0,19 for a 50-kN load. This value was used to verify the compacting effect in the rubblized concrete after application of the HMA overlay: rubblized concrete compacting is deemed to be an ongoing process and despite the imperceptibility of the relative movement of the fragments, the pavement continues to gain in strength with the loads generated by heavy vehicle traffic. The FWD readings taken one year later showed a mean structural coefficient of 0,35 for a 50-kN load, confirming a substantial strength gain in the first year of service. The variability in the FWD results for both 2005 and 2006 might be partially attributed to the variability in the rubblized material. Despite its anisotropies, however, boring in a substantial number of stretches showed that its fracture pattern was uniform. Consequently, variability was thought to be*

medidas de 2005 como de 2006, se explican de la siguiente forma: se podría atribuir parte de la variabilidad de las mediciones a la variabilidad final del material triturado/pulverizado pero, a pesar de tratarse de un material con características anisotrópicas, excavaciones realizadas en un gran número de sectores demuestran que su patrón de fractura es homogéneo, por lo tanto, se considera que la variabilidad primordial proviene principalmente de la variación de espesores del firme de hormigón y de la capa de nivelación.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El programa experimental realizado permitió determinar el coeficiente estructural del Rubblizing y demostrar que éstos son mayores que los de una base con CBR = 80-100%. Aunque los valores de coeficiente estructural determinados mediante el LFWD fueron menores que los obtenidos con el FWD, se recomienda usar los valores estimados mediante FWD. En particular se recomienda utilizar valores entre 0,25 a 0,30 que son más cercanos a los obtenidos un año después de realizado el proceso de Rubblizing. Esta recomendación se fundamenta en el siguiente análisis:

- Queda demostrado que el hormigón triturado/pulverizado aumentará su resistencia a medida que los trozos fracturados se ajusten completamente, producto de los procesos de compactación y el amasado del tránsito. Este ajuste es imperceptible y no acarrea deformaciones acumuladas a la estructura del firme.
- Por otra parte, se conoce que las mezclas asfálticas son capaces de acomodar pequeñas deformaciones (1 mm) en sus primeros años de vida (2 a 3 años), mientras conservan parte de sus características visco-elásticas, por lo cual, con el paso del tránsito, permite acomodar deformaciones muy pequeñas sin absorber tensiones por fatiga y de este modo permite que la capa de hormigón triturada/fracturada incremente su capacidad estructural a valores cercanos a 0,35, de acuerdo a mediciones realizadas en el proyecto en estudio.
- Pese a lo anterior, para firmes delgados (espesores de losa menores a 20 cm) y/o hormigones fabricados con áridos de canto rodado se recomienda utilizar valores más conservadores (< 0,25) dado que estas características del firme afectan la capacidad estructural del Rubblizing (11).

El hecho de realizar todo el análisis en base a la evaluación del coeficiente estructural se explica debido a que por las características anisotrópicas del material triturado/fracturado no se recomienda realizar diseños en base a tensiones o deformaciones admisibles. En este caso es preferible asignar un coeficiente estructural al aporte del

*largely due to the differences in concrete and regulating layer thickness.*

## 6. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

*The experimental programme successfully determined the structural coefficient of the rubblized concrete and showed it to be greater than the coefficient for a road base with a CBR = 80- 100%. Although the structural coefficients found with LFWD were smaller than the values found with FWD, use of the latter is recommended. More specifically, values of from 0.25 to 0.30 are recommended, for they are closer to the figures obtained one year after rubblizing was performed. This recommendation is based on the following:*

- *Rubblized concrete strength has been shown to increase as the fragments are compacted into place as a result of consolidation and traffic loads. Such compaction is imperceptible and involves no cumulative deformation of the pavement structure.*
- *Moreover, asphalt mixes are known to be able to accommodate small (1-mm) deformations in the first two or three years of service, when they retain part of their viscoelastic properties. Consequently, under traffic loads they can accommodate very small deformations without absorbing fatigue stress. Under these conditions, the bearing capacity of the rubblized concrete layer increases to values of nearly 0.35, according to the readings taken in the present study.*
- *Despite the foregoing, for thin pavements (thicknesses of under 20 cm) and/or concrete made with round aggregate, more conservative values (< 0.25) are recommended, for such conditions may affect the bearing capacity of the rubblized concrete (11).*

*The reason for basing the entire analysis on the structural coefficient is that the anisotropic characteristics of rubblized material advise against the use of allowable stress or strain as a basis for design. In such cases, empirical road design is recommended, and that calls for assigning the rubblized layer a structural coefficient. The*

Rubblizing y llevar a cabo un diseño empírico. La resistencia última de la capa de Rubblizing apoyada sobre el suelo de fundación se comprueba directamente en terreno debido a que el equipo de Rubblizing, al realizar cada pasada, apoya sus ruedas más cargadas (7,5 t) sobre la capa que ha sido triturada/fracturada en la pasada anterior. En otras palabras, esto permite realizar una prueba de carga simultánea sobre la estructura remanente del firme asegurándose que futuras sobrecargas de tránsito no colapsarán la estructura.

*ultimate yield strength of the concrete lying on the subgrade can be verified throughout the rubblizing operation because in each pass of the equipment, the most heavily loaded wheels (7,5 tonnes) travel on the concrete rubblized in the preceding pass. In other words, load tests can be simultaneously conducted on the resulting structure to ensure that future traffic service loads will not cause structural collapse.*

## **BIBLIOGRAFÍA / BIBLIOGRAPHY**

- (1) Ministerio de Obras Públicas (MOP): *Memoria anual Ministerio de Obras públicas*, Santiago-Chile (2002-a).
- (2) Napa National Asphalt Pavement Association: "Guidelines For Use Of HMA Overlays to Rehabilitate PCC Pavements", Information Series 117, USA (1995).
- (3) Resonant Machines: información recuperada durante 2004 del sitio web [www.resonantmachines.com](http://www.resonantmachines.com).
- (4) Thenoux, G.; González, M. (2004): "Estudio, diseño y evaluación económica de trituración/pulverización (Rubblizing) de pavimentos de hormigón mediante vibración resonante". *Revista Ingeniería de Construcción*, Escuela de Ingeniería Pontificia Universidad Católica de Chile, vol. 19 (diciembre 2004).
- (5) Thompson M.: "Hot-Mix Asphalt Overlay Design Concepts for Rubblized Portland Cement Concrete Pavement", *Transportation Research Record*, 1684 (1999), pp. 147-155. doi:10.3141/1684-17
- (6) Asphalt Institute: "Asphalt Overlays for Highway and Street Rehabilitation", *Manual Series*, nº 17 (MS-17), USA (1995).
- (7) Aashto: *Guide for Design of Pavement Structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., Estados Unidos (1993).
- (8) Thenoux, G.; González, M.: "Rubblizing Concrete Pavement Using Resonant Vibration Technology", *International Symposium on Pavement Recycling*, Sao Paulo Brasil, 14 a 16 de marzo. The Presbyterian University Mackenzie (2005).
- (9) González, M.: "Rehabilitación de Pavimentos de Hormigón Mediante la Tecnología de Trituración/Pulverización (Rubblizing) con Vibración Resonante más un Refuerzo Asfáltico". Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile (2006).
- (10) Dictuc, S.A.: "Memoria de cálculo diseño estructural de pavimentos Nuevo Acceso al Puerto de San Antonio", realizado por el Centro de Ingeniería e Investigación Vial (2003).
- (11) Thenoux, G.; González, M.: "Informe Final, Proyecto Transferencia de Tecnología de Rehabilitación y Reciclado de Pavimentos de Hormigón Mediante la Técnica de Pulverización-Trituración (Rubblizing) con Rompedor Resonante", preparado para Ministerio de Obras Públicas Chile (2007).
- (12) Witczak, M.; Rada, G.: "Asphalt Concrete Overlay Design Methodology for Fractured portland Cement Concrete Pavements", *Transportation Research Record* 1374 (1992), pp. 27-35.
- (13) Ministerio de Obras Públicas (MOP): *Manual de Carreteras*, vol. 3, Santiago-Chile (2002-b).