

Diseño de losas de hormigón con geometría optimizada

Design of concrete pavement with optimized slab geometry

Juan Pablo Covarrubias V.^{1*}

* TCPavements, Santiago. CHILE

Fecha de Recepción: 01/09/2012

Fecha de Aceptación: 11/09/2012

PAG 181 - 197

Resumen

Se ha desarrollado una nueva metodología para diseñar pavimentos de hormigón, la cual reduce el espesor de losas optimizando el tamaño de estas, dada la geometría de los ejes de los camiones. El diseño considera el apoyo sobre una base granular, tratada con cemento o asfáltica. Considera que no existe adherencia entre la base, o pavimento antiguo y la losa de hormigón. El principio fundamental del método de diseño consiste en diseñar el tamaño de la losa para que no más de un set de ruedas se encuentre en una determinada losa, minimizando así la tensión de tracción crítica en la superficie. Se han construido tramos de prueba a gran escala y probado bajo cargas aceleradas con espesores de hormigón de 8, 15 y 20 cm. todas con base granular y sobre capas asfálticas sin adherir. Las pruebas demostraron que una disminución en las dimensiones de la losa permite que siendo de bajo espesor, soporte una cantidad considerable de ejes equivalentes antes de comenzar a agrietarse. Las losas de hormigón sobre bases granulares con un espesor de 20 cm. no mostraron agrietamiento a pesar de haber sido ensayados a más de 50 millones de EE. Losas de espesor de 15 cm mostraron grietas a los 12 millones de ejes equivalentes en promedio, mientras que las losas de 8 cm de espesor, resistió 75.000 ejes equivalentes antes de las primeras grietas. Además las pruebas realizadas demostraron que las losas de hormigón con fibra pueden soportar hasta 20 veces más tráfico antes de comenzar a agrietarse, así como proporcionar una vida útil más larga una vez agrietadas. A partir de esto se ha desarrollado un software de diseño mecánico-empírico llamado OptiPave, que optimiza el diseño geométrico y el espesor de las losas de hormigón considerando las condiciones particulares de cada proyecto; ya sea clima, tráfico, capa, y materiales. Las tensiones críticas han sido calculadas utilizando el análisis de elementos finitos, para diferentes condiciones de cargas mecánicas y térmicas en diferentes posiciones. El agrietamiento de las losas se determina calculando la fatiga del hormigón y los modelos utilizados por la guía de diseño AASHTO del año 2007 y mediante calibración en secciones de prueba a gran escala. La nueva metodología diseña losas de hormigón que en promedio son 7 cm más delgadas para vías de alto tráfico en relación con el diseño tradicional de pavimentos AASHTO (1993). El método de diseño también es capaz de diseñar de manera eficiente pavimentos de hormigón para vías de menor volumen de tráfico que no son cubiertos con los actuales métodos de diseño de pavimento dando una alternativa a soluciones en asfalto.

Palabras Clave: Pavimentos de hormigón, losa de hormigón

Abstract

A new technology has been developed to design concrete pavements, which reduces slabs' thickness and optimizes their sizes, because of trucks axles' geometry. The design is supported by a gravel base treated with concrete or asphalt. It assumes there is no adherence between the base (existing pavement) and the concrete slab. The core principle of this design method consists of designing a slab size, so that no more than one wheel set stays on a given slab, thus minimizing the critical tensile stress on the surface. Test segments have been built on a large scale and they have been tested under accelerated loads, with concrete thickness of 8, 15 and 20 cm, all of them having a gravel base and non-adhered asphaltic layers. Tests demonstrated that a reduced-size slab, of low thickness, might bear a considerable amount of equivalent axles before cracking takes place. Concrete slabs on gravel bases with 20 cm thickness did not suffer from cracking, in spite of being tested under more than 50 millions of equivalent axles. Slabs of 15 cm thickness suffered from cracking when tested under an average of 12 millions equivalent axles, while slabs of 8 cm thickness endured 75,000 equivalent axles before the first cracking took place. Besides the executed tests demonstrated that fiber concrete slabs may endure until 20 times more traffic before cracking and they are able to provide a longer life span after cracking. Based on this fact, a mechanical-empirical software design has been developed and named OptiPave, which optimizes slab geometrical design and concrete slabs thickness by considering the particular conditions on a given project, such as weather conditions, traffic volume, layer and materials. Critical tensile stresses have been calculated by employing the finite elements analysis for different conditions of mechanical and thermal loads at different positions. Slabs' cracking is determined by calculating concrete fatigue damage and models employed by the design guide AASHTO, 2007, and by means of calibration test sections on large scale. The new methodology designs concrete slabs for high traffic volume ways, which in average are 7 cm thinner than traditional pavement design developed by AASHTO (1993). This design method is also able to effectively design concrete pavements for lower traffic volume roads, which are not considered by the existing pavement design methods, thus providing an alternative to asphalt solutions.

Keywords: Concrete pavements, concrete slab

1. Introducción

Las dimensiones típicas de losas de pavimentos de hormigón son de 3,6 m de ancho por 4,5 m de longitud (AASHTO 93) con espesores de entre 15 a 35 cm, dependiendo del nivel de tráfico, el clima y los materiales. El espesor requerido depende principalmente de la carga por eje y el número de repeticiones de carga, resistencia del hormigón, la longitud de la losa, y las condiciones climáticas durante el curado (alabeo de construcción)

1. Introduction

Typical dimensions for concrete pavement slabs are 3.6 m width per 4.5 m length (AASHTO 93), with thickness from 15 to 35 cm, depending on the traffic volume, the weather and materials. The required thickness mainly depends on the load per axis, the number of repeated loads, concrete strength, slab's length and weather conditions during curing process (construction curling).

¹ Autor de correspondencia / Corresponding author:
E-mail: juanpablo.covarrubias@tcpavements.com



Con el fin de reducir los efectos de la interacción de la carga y las tensiones de alabeo, se ha propuesto una nueva metodología de diseño de losas de hormigón mediante la optimización del tamaño de la losa, definiendo la geometría según el tráfico de camiones esperado (Covarrubias, 2005). En este enfoque de diseño, los tamaños de las losas se eligen de manera tal que no más de un set de ruedas del camión quede sobre una losa. Mediante la distribución de las cargas mecánicas hacia múltiples losas, las tensiones de tracción se reducen, así como las tensiones de alabeo debido a la reducción del tamaño de las losas. Un pavimento diseñado de esta forma, permite reducir el espesor de la capa de hormigón en hasta 10 cm.

Con el fin de validar este nuevo concepto de diseño, varias secciones de prueba a gran escala fueron construidos y probados en la Universidad de Illinois para entender el modo de falla y resistencia a la fatiga de este sistema. Además, para generalizar el concepto de diseño y los resultados de las pruebas a gran escala para una gran cantidad de variables de entrada, los análisis de tensiones tenían que ser completados para tener en cuenta los casos que no fueron probados directamente. Los resultados de los análisis de tensiones e investigación a gran escala se presentan en este documento y se combinan en el programa computacional de diseño OptiPave.

El uso de tamaños de losas más pequeñas y espesores delgados, el diseño del pavimento requiere de otras modificaciones con el fin de lograr la vida de diseño y la serviciabilidad esperada.

La siguiente es una lista de ajustes adicionales que se deben considerar al sistema:

Debido al mayor número de juntas de contracción y el deseo de no sellar las juntas, una hoja de sierra delgada de menos de 2,5 mm de ancho debe utilizarse para limitar el ingreso de material incompresible en la junta.

Debido a la cantidad de juntas de contracción sin sellar es necesario tener una base granular que sea menos susceptible al agua y que reduzca al mínimo la probabilidad de bombeo y por ende escalonamiento. El material de base granular fino que pasa el tamiz de 75 μm debe ser menor al 8% y debe tener un índice CBR mayor a 50%.

Debe haber una capa de geotextil entre la base y el suelo natural que actúe como una capa de separación. Este geotextil impide la penetración de la subrasante a la base, así evita la migración de finos de la subrasante a la base.

Debido a la gran cantidad de cortes de sierra, la transferencia de carga es realizado principalmente por el roce de los agregados en la junta y por lo tanto, barras de transferencia de carga y barras de amarre no son parte del diseño estándar de este sistema, exceptuando las juntas de construcción.

Con el fin de evitar que las losas delgadas se muevan lateralmente, deben estar sujetas en el borde longitudinal con una berma de hormigón, estacas (o pines) de acero verticales o con incorporación de fibras estructurales las que se han utilizado con éxito en proyectos anteriores. En la actualidad, un sistema de transferencia de carga específica se está estudiando para los diseños de gran volumen.

In order to minimize load interaction effects and curling tensile stress, a new design methodology has been proposed for concrete slabs by means of optimizing the slab size and by defining slab geometry in accordance to the expected trucks traffic volume (Covarrubias, 2005). In this design approach, slabs sizes are chosen in such a way that only one truck's wheel set stays on a slab. By means of a distribution of mechanical loads towards multiple slabs, tensile stresses are reduced, as well as curling stresses are decreased due to the slab size reduction. A pavement designed in such a way enables the reduction of concrete layer thickness down to 10 cm.

In order to validate this new design concept, several test sections were constructed on a large scale and they were tested at the Illinois University, so as to understand the failure mode and fatigue resistance of this system. Besides, in order to spread this design concept and test results, on a large scale for a great input variables amount, tension analysis had to be completed so as to consider the cases that were not directly proven. The results from tension analyses and large scale research are presented in this paper and they are mixed by the OptiPave software design.

For the use of smaller and thinner slabs sizes, the pavement design requires other modifications in order to achieve a long life span and the expected serviceability.

The following list includes additional adjustments to be considered by the system:

Due to the higher amount of induced contraction joints (which are intended not to be sealed), a thin cut saw sheet smaller than 2.5 mm width must be used to avoid that incompressible material enters the joint.

Because of the amount of non-sealed induced contraction joints, it is necessary to count with a grave base that is less susceptible to water, which shall be able to reduce pumping probability and, consequently, reducing step faulting. The fine grave base material passing through a sieve of 75 μm shall be less than 8% and it shall have a CBR index higher than 50%.

There must be a filter fabric between the base and natural soil acting as a separation layer. Such filter fabric avoids the sub-grade penetration into the base, thus avoiding fine aggregates migration from the sub-grade towards the base.

Because of the great amount of saw cuts, load transfer is mainly executed by aggregates rubbing at the joint; therefore, load transfer bars and tie-bars are not part of this standard design system excepting for construction joints.

In order to avoid lateral displacement of thin slabs, they must be held on to the longitudinal edge with concrete shoulder, stakes (or pines) made of vertical steel or incorporating fiber structures, which have been used in previous projects. Presently, a specific load transfer system is under study for large volume designs.

2. Tensiones en la losa de hormigón

Normalmente, los pavimentos de hormigón convencionales son de 3,5m a 6 m de largo, los ejes delanteros y traseros aplican carga simultáneamente cerca de las juntas transversales. Esta posición de la carga, induce tensiones de tracción superficiales en la parte superior del pavimento, especialmente cuando la losa está curvada hacia arriba. Si las secciones se cortaran de manera tal que la longitud de la losa resulte en que ni los ejes delantero ni trasero estén simultáneamente sobre la misma sección de la losa (Covarrubias, 2008), las fuerzas de tracción se reducen significativamente en la losa. Las tensiones y deformaciones calculadas en la Figura 1 se basan en un espesor de hormigón de 20 cm, 1500 kg de carga, y un diferencial de -15°C de temperatura.

2. Concrete slab tensile stress

Generally, conventional concrete pavements have a length from 3.5 m to 6 m, and front and rear axles simultaneously apply load near transverse joints. Such load position produces surface tensile stress on the pavement upper area, especially when the slab is curved upwards. If sections were cut in such a way the slab length prevents front or rear axles to stay simultaneously on the same slab section (Covarrubias, 2008), then slab tensile stress would be significantly reduced. Tensions and deflections calculated on Figure 1 are based on a concrete thickness of 20 cm, load of 1500 kg, and a temperature differential of -15°C.

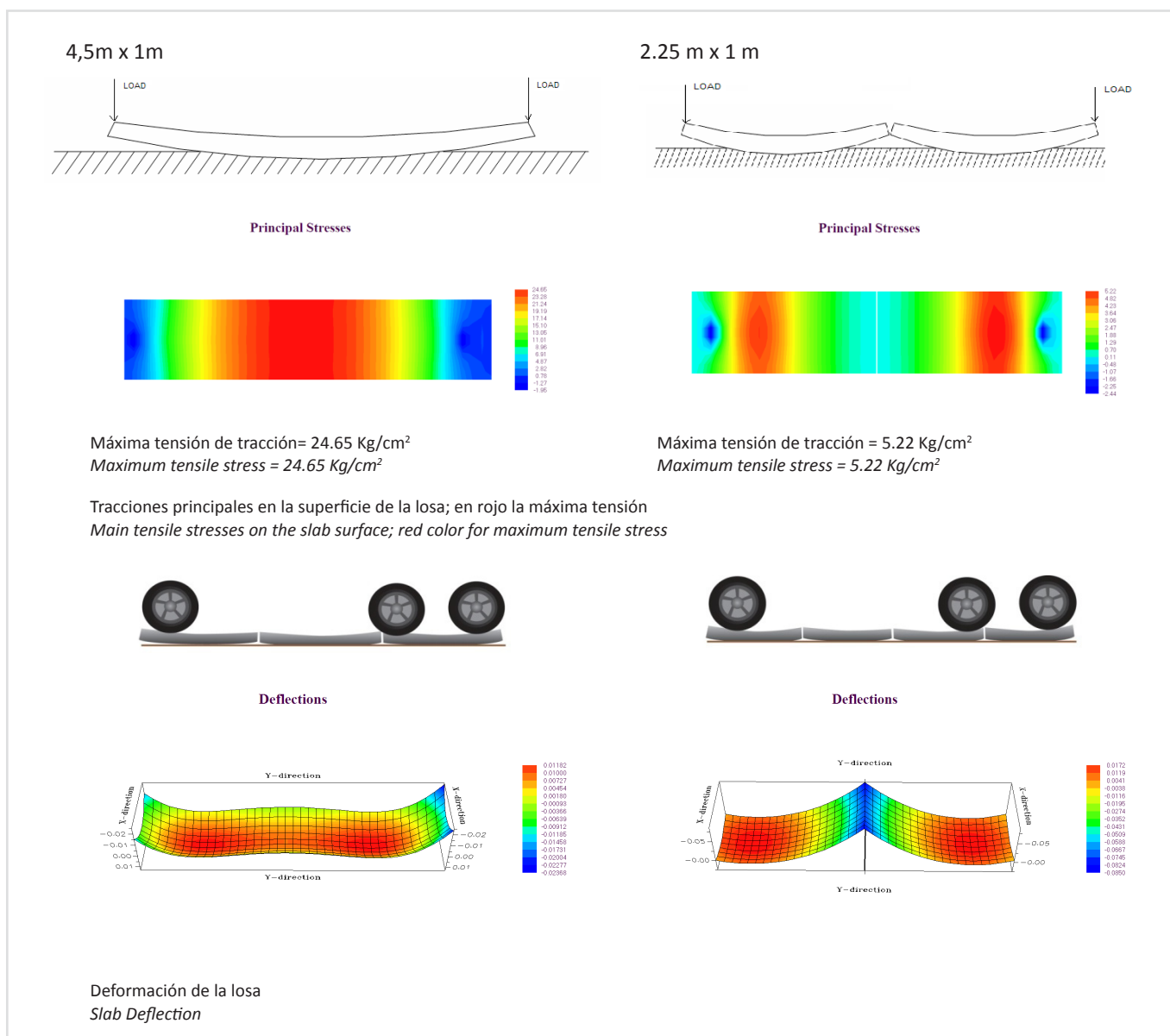


Figura 1. Comparación de la tensión de tracción de una losa cargada mecánica y térmicamente entre una de 4,5m y 2.25, de longitud
Figure 1. Comparison between tensile stress of a mechanical and thermal loaded slab, considering 4.5 m and 2.25 Slabs' lengths

2.1 Configuración de carga para Análisis de Tensiones

Para reducir la tensión de tracción superior causada por la carga simultánea de la losa por ejes de dirección, es necesario dimensionar la losa de tal manera que cada rueda, o un conjunto de ruedas, siempre cargue una sola losa diferente tal como se muestra en la Figura 2. Como existen diferentes tipos de configuraciones de ejes de camiones, la geometría está diseñada para el tipo de camión que tenga el eje más crítico en la utilización de la carretera. La reducción de tensiones de tracción en la parte superior de la losa permite una vida útil más larga y una reducción en el espesor de la losa en relación con el diseño de pavimentos de hormigón convencional. Se utilizó el programa de diseño de elementos finitos ISLAB2000 para construir un modelo de tensiones que muestre el beneficio de reducir las dimensiones y espesor de la losa, lo que se muestra en la Figura N° 2. Para la configuración de tensiones, se utilizó los siguientes parámetros, 55MPa/m para el valor k, un diferencial de temperatura de -14°C, rigidez del hormigón de 290.000 Kg/cm², coeficiente de Poisson de 0.25, y el coeficiente de expansión térmica de 1×10^{-5} /°C.

2.1 Load configuration for Tensile Stress Analysis

In order to reduce high tensile stress caused by directional axles due to a simultaneous load, it is necessary to dimension the slab in such a way each wheel, or wheel set, is always loading a different single slab, as shown on Figure 2. As there are different configuration types of trucks axles, slab geometry is designed for the kind of truck having the most critical axle for highways use. Reduction of tensile stress on the upper slab area provides a longer life span and, a slab thickness reduction regarding traditional concrete pavement design. The finite elements program ISLAB2000 was used to build the tensile stress model showing the benefits of reducing slab dimensions and thickness as presented on Figure 2. For tensile stress configuration, the following parameters were used: 55MPa/m for k value, temperature differential of -14°C, concrete stiffness of 290,000 Kg/cm², Poisson Coefficient of 0.25 and, thermal expansion coefficient of 1×10^{-5} /°C.

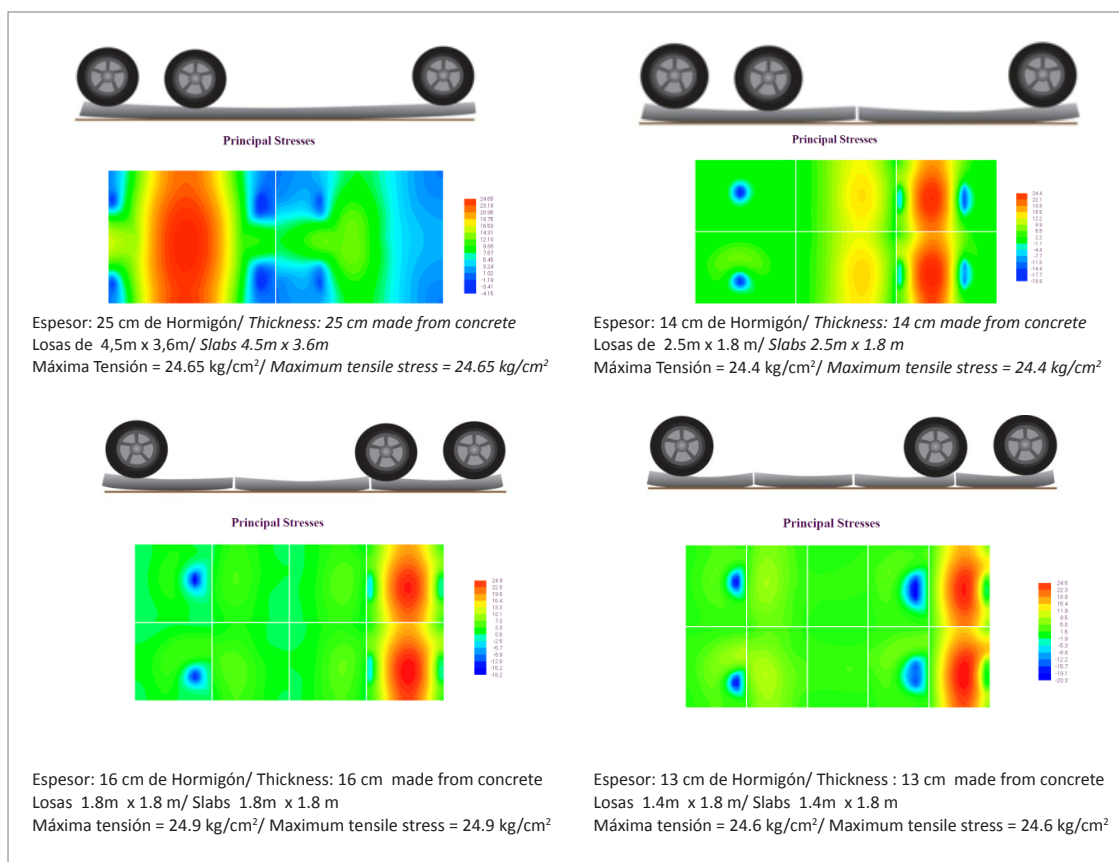


Figura 2. Comparación entre la dimensión y espesor de losas para tensiones máximas equivalentes en la superficie.

Figure 2. Comparison between slabs' dimension and thickness for maximum equivalent tensile stress on the surface

El objetivo de desarrollar el programa computacional de diseño llamado OptiPave, es que será capaz de optimizar el espesor y la geometría de cada losa para cualquier conjunto de clima, materiales, y tráfico. En primer lugar, el tamaño de la losa es seleccionada de tal manera que sólo un set de ruedas se encuentra cargando cada losa, típicamente entre 1,4 m a 2,5 m. Las tensiones se calculan en la parte superior e inferior de la losa, para diferentes condiciones de entrada, es decir, espesor, alabeo, tráfico, tipo de eje, etc. y diferentes configuraciones de carga, como se muestra en la Figura N°3.

The purpose of developing the design software OptiPave is to optimize the thickness and geometry of each slab for any weather condition, materials and traffic volume. In the first place, the slab size is selected in such a way only one wheel set is loading each slab, typically between 1.4 m to 2.5 m. Tensile stresses are calculated from the upper and lower slab area, for different entry conditions, i.e., thickness, curling, traffic, axle type, etc., and different load configurations, as shown on Figure 3.

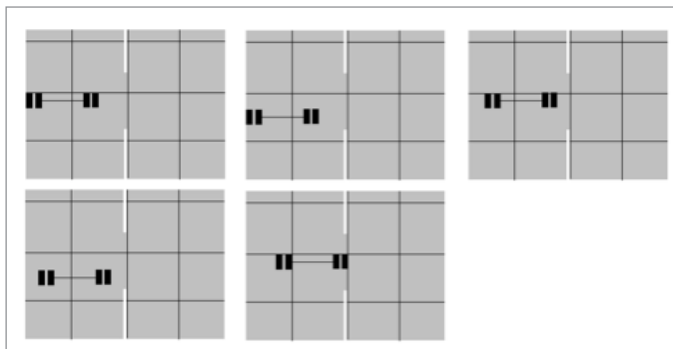


Figura 3. Posiciones de carga consideradas por las losas como tensiones de tracción críticas.

Figure 3. Slabs loading positions considered as critical tensile stresses.

Basado en la máxima tensión de tracción, en cada posición de carga, los pasos permitidos para cada condición (N_{ijk}) se calcula en base a la ecuación de la fatiga MEPDG (ARA 2007)

Based on the maximum tensile stress, on each loading position, the permitted steps for each condition (N_{ijk}) are calculated by means of the fatigue equation MEPDG (ARA 2007)

$$\log(N_{ijkl}) = 2 \times \left(\frac{C_3 \times \sigma_{ijkl}}{MOR \times C_1 \times C_2} \right)^{-1,22} \quad (1)$$

N_{ijkl} = Pasadas permitidas para eje en la posición k, alabeo i (temperatura), nivel de carga j, y tensión crítica en la parte superior e inferior

N_{ijkl} = permitted rides for an axle in k position, i curling (temperature), j loading level and critical tensile stress in the upper and lower areas.

σ_{ijkl} = Tensiones principales calculadas con ISLAB2000 para ejes en la posición k, alabeo i y carga j, y tensión crítica en la parte superior e inferior

σ_{ijkl} = main tensile stresses calculated by means of ISLAB2000 for axles in k position, i curling, j loading and critical tensile stress in the upper and lower areas.

MOR= Resistencia a la flexión del hormigón a los 90 días

MOR= concrete flexure strength at 90 days

C_1 = Factor de corrección por geometría de la losa y su espesor

C_1 = Correction factor for slab geometry and thickness

C_2 = Factor de corrección estructural de fibra.

C_2 = Correction factor for fiber structure

C_3 = Factor de corrección de carga perimetral

C_3 = Correction factor for loading perimeter

Utilizando la hipótesis de Miner, el daño por fatiga para cada posición es determinado en la parte superior e inferior de la losa sobre la base de la siguiente fórmula:

By employing the Miner's hypothesis, fatigue damage is determined for each position in the slab upper and lower area based on the following formula:

$$FD_k = \sum_i \frac{n_{ijk}}{N_{ijk}} \quad (2)$$

Donde:

Where:

FD_k = Daño por fatiga para una posición determinada del eje k

FD_k = Fatigue damage for a particular position on k axle

n_{ijk} = Número de pasadas para la tensión local I para condición i,j,k

n_{ijk} = Number of rides for I local tension under i,j,k condition

N_{ijk} = Número de pasadas permitidas para la tensión local I para condición i,j,k

N_{ijk} = Number of permitted rides for I local tension under i,j,k condition

El porcentaje de losas agrietadas se determinan para el 50% de confiabilidad para cada posición superior e inferior, basado en MEPDG daño causado por fatiga en el modelo de agrietamiento (ARA, 2007)

The percentage of cracked slabs is determined with 50% reliability in each upper and lower position, based on MEPDG, which is fatigue damage in the cracking model (ARA, 2007)

$$\%Crack_{kl} = \frac{1}{1 + FD_{kl}^{-1,98}} \quad (3)$$

Donde:

$\% Cracks_{kl}$ = Porcentaje de losas agrietadas en posición del eje k
 FD_{kl} = Daño por fatiga con eje en la posición k y ubicación de esfuerzo l

Combinando el agrietamiento desde cada posición para determinar el total de fisuras en el pavimento para el 50 por ciento de confiabilidad:

$$Tcracks_l = MAX(\%Cracks_{kl}) \quad (4)$$

$$TTCracks50 = Tcracks_i + Tcrackss - Tcracks_i * Tcrackss \quad (5)$$

Donde:

$TTCracks50$ = % total de losas fisuradas, 50% de confiabilidad:
 $Tcracks_i$ = % losas fisuradas desde la superficie
 $Tcrackss$ = % losas fisuradas desde parte inferior

La Confiabilidad es determinada con la misma metodología que el MEPDG (ARA 2007) y se presenta a continuación:

$$TTCracks_m = TTCracks_{50} \times Z_r \times S_e \quad (6)$$

$$S_e = \left(5,3116 \times TTCracks_{50}^{0,3903} \right) + 2,99$$

Donde:

$TTCracks_m$ = % losas agrietadas, m % confiabilidad
 $TTCracks_{50}$ = % total de losas agrietadas, 50% confiabilidad
 Z_r = Coeficiente normal estándar para un nivel de confianza dado.
 S_e : Error estándar.

3. Validación del concepto de diseño usando ensayo acelerado en pavimentos

Secciones de prueba a gran escala de este nuevo sistema de pavimento de hormigón se construyeron y fueron probados bajo condición de carga acelerada por la Universidad de Illinois. Tres secciones de prueba de 40 m se construyeron para determinar los efectos del espesor de las losas, la rigidez de la base, y la mezcla de pavimento sobre el comportamiento del pavimento de hormigón. Las losas fueron construidas con dimensiones de 1,8 m por 1,8 m. Un total de 14 losas y juntas fueron probadas durante cada secuencia de carga. En cada sección de prueba hubo dos variables y por lo tanto 7 losas y juntas fueron objeto de prueba para cada variable.

Where:

$\% Cracks_{kl}$ = Percentage of cracked slabs in k axle position
 FD_{kl} = Fatigue damage with axle in k position and l stress location

By combining cracking taking place in each position, it is possible to determine the pavement total fissures with 50% reliability.

Where:

$TTCracks50$ = % of total fissured slabs, 50% reliability
 $Tcracks_i$ = % of fissured slabs from the surface
 $Tcrackss$ = % of fissured slabs from the inner area

Reliability is determined by means of the same methodology developed by MEPDG (ARA 2007) and it is presented as follows:

Where:

$TTCracks_m$ = % of cracked slabs, m % reliability
 $TTCracks_{50}$ = % total of cracked slabs, 50% reliability
 Z_r = Normal standard coefficient for a given reliability level
 S_e : Standard error

3. Validation of design concept by using an accelerated pavement test

Large scale test sections for this new concrete pavement system were constructed and they were tested under accelerated load conditions by the University of Illinois. Three test sections of 40 m were constructed to determine the effects of the slabs thickness, the base stiffness and the pavement mixture on the concrete pavement behavior. Slabs were built up with 1.8 m x 1.8 m dimensions. A total of 14 slabs and joints were tested on each loading sequences. Each test section had two variables and, therefore, 7 slabs and joints were tested for each variable.

No se colocaron barras de traspaso de cargas ni se sellaron las juntas en ninguna sección. Se utilizó un dispositivo de ensayo acelerado, llamado ATLAS (Accelerated Transportation Loading Assembly) para cargar las losas, el cuál es de 38 m de largo y puede ensayar secciones de 26 m de longitud. Este ensayo acelerado fue realizado en todas las secciones hasta que se encontró un nivel significativo de daño por agrietamiento del pavimento en niveles de mediana y alta severidad. En la tabla N°2 se muestra un resumen del número total de EE aplicados a cada sección y el número de losas agrietadas. En la mayoría de los casos, se necesitó un número significativo de sobrecarga para producir la falla en alguna de las secciones. El número aproximado de Ejes Equivalentes aplicados a cada sección fue calculado basado en un factor de mayoración de tránsito lateral (Cervantes y Roesler, 2009).

Los resultados de las pruebas mostraron que la sección de 20 cm. de hormigón sobre una base granular resistió el mayor número de ejes equivalentes (51 millones) sin mostrar daño alguno. De hecho, esta sección fue cargada aproximadamente por 7.400 pasadas de una carga de rueda de 157 kN y la losa no presentó agrietamiento alguno. La sección de 15 cm. sobre una base asfáltica soportó 69 millones de EE antes de un agrietamiento significativo mientras que una losa de hormigón de 15 cm sobre una base granular resistió 15 millones de ejes equivalentes antes de un agrietamiento importante. Por último, las losas más delgadas de 9 cm de espesor resistieron 75.000 EE sin fibra y 230.000 reforzadas con fibra.

Neither transfer bars nor loading bars were installed; the joints were not sealed at any section. An accelerated Loading Assembly, named ATLAS, was employed to load slabs, which has 38 m length and it is well capable of testing sections of 26 m length. This accelerated test was executed in all sections until achieving a significant pavement cracking damage at medium and high severity level. Table 2 shows a summary of total equivalent axles applied on each section and the number of cracked slabs. In most of the cases, a significant overloading amount was required to reduce failure in some sections. The approximated number of Equivalent Axles applied on each section was calculated based on a step-up side traffic volume (Cervantes and Roesler, 2009).

Test results showed that the 20 cm section, elaborated from concrete on a gravel base, endured the greatest amount of equivalent axles (51 millions) without showing any damage. In fact this section was loaded approximately by 7,400 wheel load rides of 157 kN and the slab showed no damage at all. The section of 15 cm on an asphaltic layer endured 69 million of EA before a significant cracking took place, while the concrete slab of 15 cm on a gravel base endured 15 millions of equivalent axles before a relevant cracking took place. Finally, thinner slabs of 9 cm endured 75,000 EA without fiber reinforcement and 230,000 with fiber reinforcement.

Tabla 1. Resumen de los Resultados del Ensayo Acelerado en las diferentes secciones
Table 1. Results Summary from accelerated Loading Assembly test in different sections

Espesor/ Thickness	Ubicación de La sección/ Section location	Tipo de Base/ Base Type	Ubicación de la Carga/ Load location	Ejes Equivalentes Acumulados/ Cumulative Equivalent Axles	Losas Quebradas (De 7 en Total)/ Cracked slabs (out of 7 in total)	Valor k De la Subrasante MPa/m/ K Value of sub-grade MPa/m
10 cm	Sur/ South	Asfalto/ Asphalt	Borde/ Edge	4,4 E+07	7	68
10 cm	Norte/ North	Asfalto/ Asphalt	Borde/ Edge	6,4 E+06	7	68
15 cm	Sur/ South	Asfalto/ Asphalt	Borde/ Edge	3,7 E+07	1	136
15 cm	Norte/ North	Asfalto/ Asphalt	Borde/ Edge	6,9 E+07	4	136
15 cm	Sur/ South	Granular/ Gravel	Borde/ Edge	2,3 E+07	4	81
15cm	Norte/ North	Granular/ Gravel	Borde/ Edge	1,7 E+07	6	27
20 cm	Sur/ South	Granular/ Gravel	Borde/ Edge	2,0 E+07	0	41
20 cm	Norte/ North	Granular/ Gravel	Borde/ Edge	5,1 E+07	0	27
9 Cm	Sur/ South	Granular/ Gravel	Borde/ Edge	2,3 E+05	7	41
9 cm FRC	Sur/ South	Granular/ Gravel	Borde/ Edge	2,3 E+05	3	41
9 Cm	Norte/ North	Granular/ Gravel	Junta Long./ Long. Joint	4,7 E+03	7	14
9 cm FRC	Norte/ North	Granular/ Gravel	Junta Long./ Long. Joint	6,4 E+04	4	14
FRC: Pavimento Reforzado con Fibra						



4. Serviciabilidad (IRI) y escalonamiento

La serviciabilidad de un pavimento es un factor clave en el diseño y mantenimiento de pavimentos. Los modelos existentes para predecir el IRI no se aplican directamente a este nuevo concepto de diseño de pavimentos de hormigón. El IRI obtenido luego de la construcción debe ser similar al de un pavimento de hormigón convencional, el cual depende principalmente del equipamiento y habilidad del contratista. Por otra parte, el IRI puede estar afectado de forma drástica por alabeos y deformaciones lo que se debe reducir con una menor longitud de la losa.

Uno de los resguardos principales para tener en cuenta con el diseño TCP es la posibilidad de escalonamiento en el largo plazo. El diseño, dada sus características, reduce las probabilidades de que esto suceda, debido a las siguientes razones:

El alabeo en las losas produce escalonamiento, Pavimentos con diseño TCP tiene alrededor de un quinto del alabeo con respecto a un pavimento tradicional. Esto debido al menor tamaño de losa. Como el alabeo es menor el escalonamiento y el IRI también lo son.

Los pavimentos TCP usan bases con menos de 8% de fino. Esto hace que las piedras grandes estén en contacto entre ellas, por lo que al remover el fino en el caso de presencia de agua no exista un cambio volumétrico y por lo tanto no exista una pérdida de soporte. Esto evita que se produzca bombeo y que por lo tanto se alteren las condiciones de la base. Como se reduce la erosión en la base se disminuye drásticamente el escalonamiento.

Las losas son más pequeñas, lo que genera un apertura de la grietas bajo los cortes de menor espesor. Estas grietas tienen una mejor transferencia de carga, lo que disminuye el escalonamiento.

Para el tráfico ligero y medio, el escalonamiento no es un problema esperado por los motivos antes mencionados. Cuando el tráfico es muy pesado con muchos ciclos de carga, se puede diseñar una solución de 2.3 metros de largo de losa y barras de transferencia de carga en lugares estratégicos en caso de que no exista riesgo de escalonamiento a largo plazo. A continuación se muestran los resultados de IRI y escalonamiento en el inicio y en el año 2010 de diferentes tramos de pavimentos de hormigón construidos en Guatemala (Tabla 2)

Hasta la fecha, se han pavimentado más de 3.000.000 de metros cuadrados con esta tecnología, principalmente en Chile, Perú y Guatemala. Entre los proyectos hay: carreteras, caminos y pavimentos de bajo volumen, calles, pavimentos exteriores de centros de distribución y estacionamientos con espesores de un mínimo de 8 cm. Todos sobre material granulares o pavimentos antiguos muy deteriorados.

4. Serviceability (IRI) and step faulting

Pavement serviceability is a key factor for designing and maintaining pavements. The existing models used for predicting IRI are not directly applied to this new concrete pavement design concept. The IRI obtained after construction must be similar to the one obtained by a conventional concrete pavement, which mainly depends on equipment and contractor's skills. On the other hand, IRI can be drastically affected by curling and deflections, which must be reduced with a lower slab length.

One of the main considerations to be taken into account when designing TCP is step faulting in the long term. Due to its characteristics, design reduces the step faulting probabilities because of the following reasons:

Slab curling produces step faulting. Pavements with TCP design have approximately one fifth of curling in comparison to a traditional pavement. This is because of the smaller slab size. Since curling is lower, step faulting and IRI are lower too.

TCP pavements employ bases with less than 8% of fine aggregates. This enables bigger stones to make contact among them. Consequently, when removing fine aggregates in presence of water, there will be no volume reduction and; therefore, bearing capacity loss will not take place. Hence pumping is avoided and the base conditions are not affected at all. As the base erosion is reduced, step faulting is drastically reduced too. Since slabs are smaller, the cracking openings under cuts have a lower thickness. Such cracks have an improved load transfer, which decreases step faulting.

For low and medium traffic volume, step faulting is not an expected condition due to the aforementioned reasons. When traffic volume is too heavy with too many loading cycles, a slab solution of 2.3 m length can be designed and transfer bars can be strategically installed, in case there is no step faulting risk in the long term. IRI and step faulting results for year 2010 on different concrete pavements sections built in Guatemala are shown below (Table 2).

So far, more than 3,000,000 square meters have been paved using this technology, mainly in Chile, Peru and Guatemala. Among these projects there are: highways, roads and low volume pavements, streets, distribution center exterior pavements and parking lots with a minimum thickness of 8 cm. All of them were paved on gravel material or very old and deteriorated pavements.

Proyecto/ Project	Año de Const./ Construction year	Largo Total (Km-Pista)/ Total length (Km- Road)	Espesor (cm)/ Thickness (cm)	EE de Diseño/ EA Design	EE Año 2010/ EA Year 2010	IRI Inicial (m/km)/ Initial IRI (m/km)	IRI Año 2010 (m/ Km)/ IRI Year 2010 (m/Km)	Escalona- miento (mm)/ Step Faulting (mm)
Amatitlán Palín	2006	25,640	21	110,000,000	22,000,000	1.76	2,01	<2
San Lucas Milpas	2007	5,985	17	17,000,000	3,000,000	2.15	2,34	<2
Tecpán Los Encuentros	2009	81,217	18	20,000,000	1,111,111	-	2,07	<2
San Cristobal San Lucas	2006	21,834	17	35,000,000	8,235,294	2.1	1,72	<2

Tabla 2. Mediciones de IRI y Escalonamiento en Proyectos de losa con geometría optimizada en pavimentos de Guatemala

Table 2. IRI and Step Faulting Measurements Results from Projects using slab optimized geometry in Guatemala's pavements

5. Estudios de proyectos ejecutados en Chile

5.1 Ruta M-50 Cauquenes Chanco

La ruta M-50 es una ruta que une cauquenes con la localidad de chanco en la región del Maule, es un diseño para 27.000.000 EE donde, en el caso de la solución en hormigón se intentó utilizar en su mayoría el pavimento existente.

Este proyecto está actualmente en ejecución y es el un contrato licitado con dos alternativas: asfalto, con una estructura de 20 cm de subbase granular, 20 cm de base granular, 8 cm de Binder y una carpeta de rodado de 7 cm de asfalto modificado, y la alternativa en hormigón considera una subbase de 15 cm, que podrá ser colocada sobre el pavimento antiguo o sobre el terraplén por el cambio geométrico, y un pavimento de 17 cm de espesor con un hormigón HF 5,3 a 90 días. No se colocó ningún drenaje diferente a los del diseño original y en curvas cerradas, con radio de menores de 150 m, se amaron las bermas para ensanchar en términos estructurales el pavimento, alejando el tráfico del borde de este. El diseño en hormigón fue realizado utilizando el software Optipave donde su resultado se puede apreciar en la Figura 4

5. Studies on projects executed in Chile

5.1 M-50th Road, Cauquenes – Chanco

M-50th Road is a road that connects Cauquenes with Chanco commune in the Maule's Region. It was designed for 27,000,000 EA, where the concrete solution intended to employ the existing pavement mostly.

This project is presently under execution and it is a contract tendered with two alternatives: asphalt having a 20 cm structure made of gravel sub-base, 20 cm of gravel base, and 8 cm of Binder and a surface of 7 cm made of modified asphalt. Concrete alternative considers a sub-base of 15 cm, which can be laid on the existing pavement or on the embankment due to geometrical modification and; a pavement of 17 cm thickness made of concrete HF 5.3 at 90 days was also considered. None draining base different to the one in the original design was employed; on short radius bends, with radius lower than 150 m, shoulders were tied to widen the pavement on structural terms, thus distancing traffic from its edge. Concrete design was developed by using the OptiPave software, which results can be observed on Figure 4.

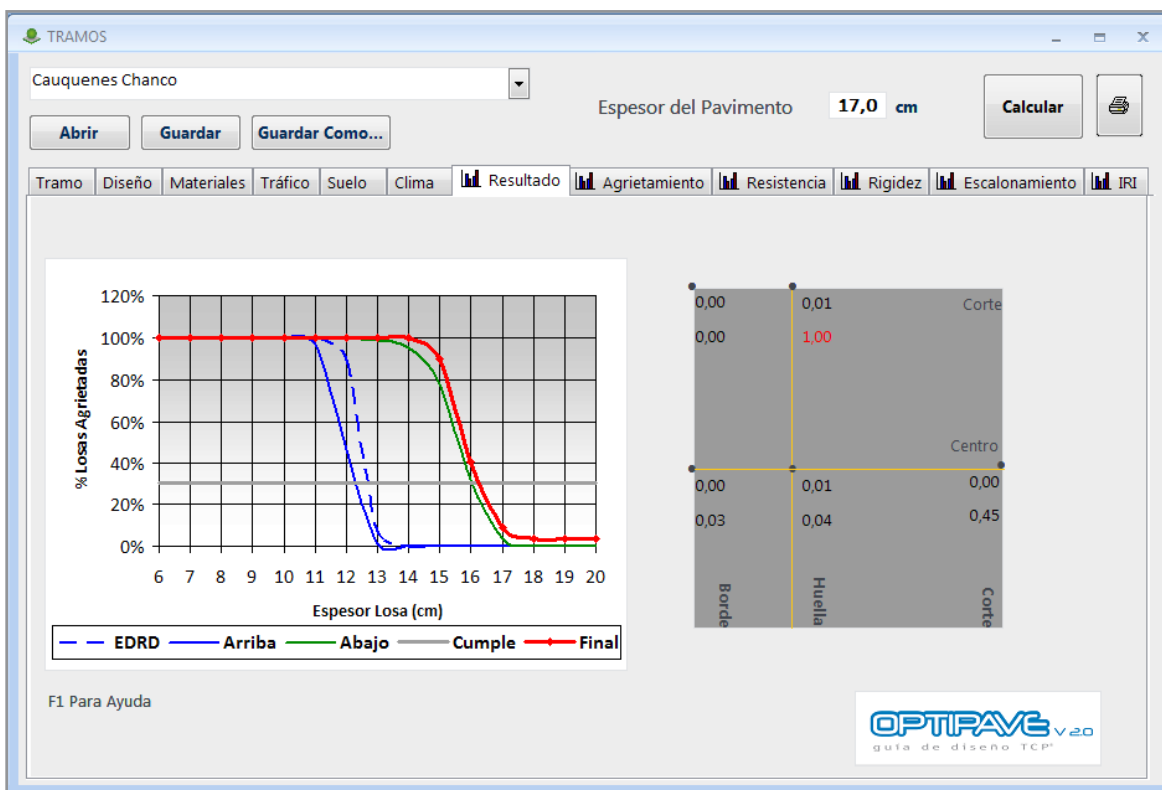


Figura 4. Ventana de salida del Software OptiPave para el diseño de Cauquenes Chanco

Figure 4. Output screen of OptiPave Software for Cauquenes – Chanco design

5.2 Ruta 60 Chile

La Ruta 60 conecta a Los Andes (Chile) y Mendoza (Argentina) y es la conexión terrestre principal entre ambos países. El pavimento atraviesa la Cordillera de Los Andes a una altitud de entre 2.000 y 3.500 metros. El diseño es para 20.000.000 de Ejes Equivalentes con un k del suelo de 120 Mpa/m, una Subbase no heladiza (menos de 5% de finos bajo la malla #200) 45 cm de espesor, hecha de árido chancado.

El espesor del pavimento obtenido con el método AASHTO 1993 fue de 22 cm con losas de 4 m de largo y 3,5 m de ancho y con una resistencia a la flexión de 5 MPa sin barras de transferencia de carga.

El pavimento fue abierto al tráfico a los 21 días de construido, con más del 75% de losas agrietadas. El pavimento falló en menos de una semana con el 100% de las losas con grietas transversales. El tramo fue cerrado a tráfico con el fin de analizar las causas de este fenómeno. Se calculó el alabeo de las losas midiendo la diferencia entre las alturas del centro y las esquinas de las losas. Este nivel de alabeo corresponde a un diferencial de temperatura (T° Superior- T° Inferior) de aproximadamente -35°C . Se utilizó Islab2000 para calcular el gradiente de temperatura equivalente a las mediciones de perfil obtenidas por el contratista. Se calculó la temperatura en el momento en que se realizó la medición siendo esta un diferencial térmico real de $+6^\circ\text{C}$ por lo que el diferencial de temperatura equivalente al gradiente de construcción corresponde a -41°C . El análisis de elementos finitos mostraron los siguientes esfuerzos para los diferentes diferenciales de temperatura equivalentes, tanto el de construcción (Fijo) como ambiental (Variable).

5.2 60th Road, Chile

The 60th Road connects Los Andes (Chile) to Mendoza (Argentina) and it is the main inland connection between both countries. Pavement crosses Los Andes Mountain Range at 2,000 and 3,500 meters high. The design considers 20,000,000 Equivalent Axles with a k soil of 120 Mpa/m, a non-freezing sub-base (less than 5% of fine aggregates, sieve # 200) of 45 cm thickness, which is made of crushed aggregates.

Pavement thickness obtained by means of the method developed by AASHTO 1993 yielded 22 cm, with slabs of 4 m length, 3.5 m width, and flexure resistance of 5 MPa without loading transfer bars.

Pavement was opened for traffic at 21 days after construction, with more than 75% of cracked slabs. The pavement failed in less than a week showing 100% of transverse cracking slabs. The section was closed for traffic in order to analyze the causes of such phenomenon. Slab curling was calculated by measuring the differences between the slabs center heights and corner heights. Such curling level corresponds to a temperature differential (Higher T° - Lower T°) at approximately 35°C . Islab2000 was employed to calculate the temperature gradient equivalent to section measurements obtained by the contractor. Temperature was calculated at the very same moment the measurement was executed, delivering a real thermal differential of $+6^\circ\text{C}$, therefore, the temperature differential equivalent to the construction gradient corresponds to -41°C . The finite elements analysis showed the following stresses for different equivalent temperature differentials, as much as for construction (fixed) as environmental (variant).

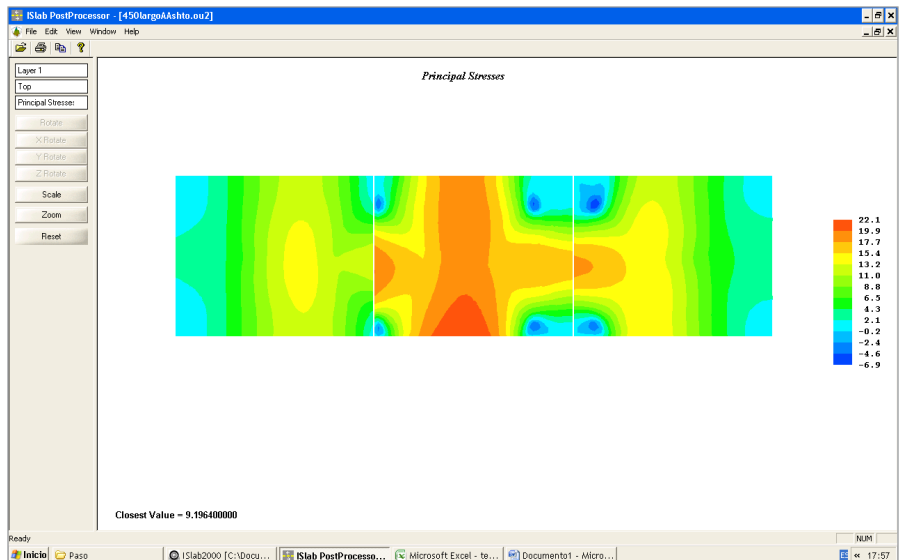


Figura 5. Esfuerzo de tracción para un diferencial de temperatura equivalente de $-6^{\circ}\text{C} + -10^{\circ}\text{C}$
 Figure 5. Tensile Stress for an equivalent temperature differential at $-6^{\circ}\text{C} + -10^{\circ}\text{C}$

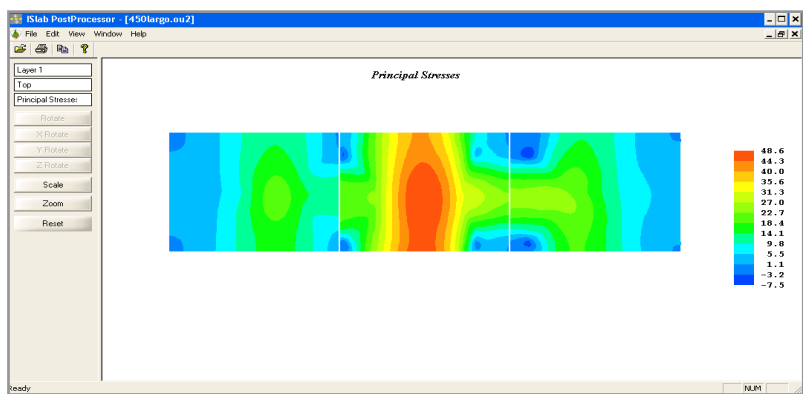


Figura 6. Esfuerzo de tracción para un diferencial de temperatura equivalente de -35°C
 Figure 6. Tensile Stress for an equivalent temperature differential at -35°C

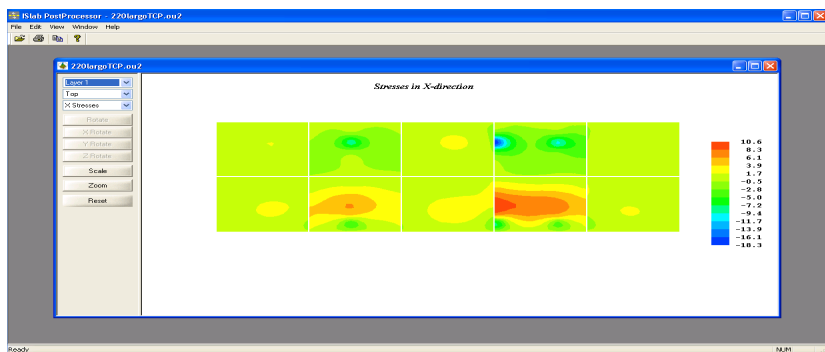


Figura 7. Esfuerzo de tracción con Diseño TCP (2m x 1,75m) para un diferencial de temperatura equivalente de -35°C
 Figure 7. Tensile Stress with TCP Design for an equivalent temperature differential at -35°C

Usando estos niveles de esfuerzos y las ecuaciones de fatiga del M-EPDG se obtuvo la siguiente tabla en término del número de pasadas de camiones necesarios para producir un nivel de deterioro equivalente, según diferentes métodos de diseño.

By employing these stress levels and fatigue equations M-EPDG, the following table was obtained including the number of trucks rides required to produce an equivalent damage level, according to different design methods.

	Tensión tracción Máxima (MPa)/ Max. Tensile Stress (MPa)	Número Pasadas Necesarios (EE)/ Number of required rides (EA)	Espesor Capa Hormigón (cm)/ Concrete layer thickness (cm)	Largo Losa (cm)/ Slab Length (cm)	Alabeo Total. (°C)/ Total Curling (°C)	Distancia entre Ejes (cm)/ Distance between Axles (cm)	Kc (MPa/m)/ Kc (MPa/m)
Diseño AASHTO 4m, alabeo real(AASHTO design 4m, real curling)	4.9	105	22	450	-35	350	120
Losas de 3m con eje delantero/ Slabs of 3m with front axle	3.3	1785	22	300	-35	350	120
Losas de 3m con eje trasero/ Slabs of 3m with rear axle	3.4	1329	22	300	-35	250	120
Diseño AASHTO 4m Alabeo estimado/ AASHTO design 4m estimated curling	2.2	192,028	22	450	-10	350	120
Diseño TCP/ TCP design	1.3	Infinito	22	220	-35	350	120
Diseño TCP/ TCP design	2.3	243.879	17	220	-35	350	120

Tabla 3. Desempeño de diferentes diseños y el efecto al considerar el alabeo
Table 3. Performance and Effects of different designs when considering curling

Las imágenes a continuación muestran el desempeño del pavimento a poco tiempo de haber sido construidos. El pavimento de la izquierda fue diseñado mediante AASHTO 1993 mientras que el pavimento de la derecha con tecnología de optimización TCP. Las grietas en la imagen de la derecha se produjeron a las pocas horas de la apertura al tráfico mientras que la derecha fue tomada nueve meses después de haber sido pavimentado y no presenta ninguna grieta

The pictures below show the pavement performance a short time after its construction. The pavement on the left was designed according to AASHTO 1993, while the pavement on the right was constructed as per TCP optimization technology. The picture's cracks took place a few hours after traffic opening, while picture at the right side was taken 9 months after paving, showing no cracking at all.



Figura 8. Grietas en un pavimento diseñado por AASHTO 1993 con losas 4 m de largo
Figure 8. Cracking on a pavement designed by AASHTO with slabs of 4 m length

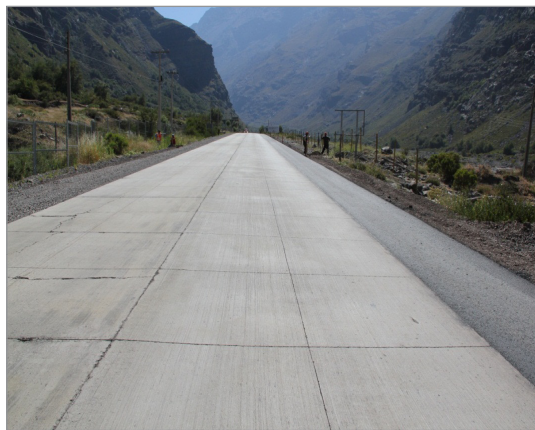


Figura 9. Diseño TCP luego de 8 meses desde la construcción
Figure 9. TCP design, 8 months after construction

Para comprobar el diseño, se utilizó un gradiente térmico equivalente de construcción de -6°C en el M-E PDG dando como resultado un espesor de 22 cm muy similar a AASHTO 93. Si el gradiente térmico equivalente de construcción utilizado en el M-E PDG fuera el medido (-25°C) el espesor debería haber sido de 37 cm. El método de diseño de geometría optimizada TCP reduce los esfuerzos en la superficie debido al alabeo. Usando el software Optipave, el espesor necesario sería de 17 cm. En la Tabla 4 se muestra un resumen.

In order to prove the design, a construction equivalent thermal gradient of -6°C was employed by the M-E PDG delivering a 22 cm thickness, which is a result quite similar to the one delivered by AASHTO 93. If the construction equivalent thermal gradient employed by M-E PDG were the one measured at -25°C , then the thickness should have been 37 cm. The design method of TCP optimized slab geometry reduces stresses on the surface due to curling. By using the OptiPave software, the required thickness would be 17 cm. Table 4 shows a summary.

	M-E PDG	M-E PDG	AASHTO 93	TCP
K Suelo/ K Soil	120 MPa/m			
Clima/ Weather Condition	Palmdale-California			
Gradiente Térmico Equivalente de const./ Thermal Gradient construction equivalent.	-6°C	-25°C	-----	-20°C^*
Dimensiones losa hormigón(cm)/ Concrete Slab Dimensions (cm)	400x350			200x175
Espesor del hormigón/ Concrete thickness	22	37	22	17
Serviciabilidad/ Serviceability	10% Losas Agrietadas/ 10% Cracked Slabs	10% Losas Agrietadas/ 10% Cracked Slabs	4.5–2.5 (Pí-Pi)	10% Losas Agrietadas/ 10% Cracked Slabs
* Valor mínimo en Optipave/ * Minimum value in OptiPave				

Tabla 4. Espesor necesario según diferentes métodos para el proyecto Ruta 60
Table 4. required thickness according to different methods for 60th Road Project

Dos secciones de prueba de 500 m fueron construidos utilizando el método de diseño TCP y utilizando el software OptiPave. El primero fue un pavimento de hormigón con fibras de 15 cm de espesor; y el segundo de 17 cm sin fibra.

Two 500 m – test road sections were built by employing TCP design method and using the OptiPave software. The first was a fiber reinforced concrete pavement of 15 cm thickness and, the second of 17 cm without fiber reinforcement.



Figura 10. 15cm hormigón con fibra y diseño TCP en la Ruta 60 para 20.000.000 de EE (2 años en servicio)
Figure 10. 15 cm of fiber reinforced concrete and TCP design on 60th Road for 20,000,000 EA (2 years in service)

5.3 Ruta 5 Talca (Chile)

En la Ruta 5 Sur, en Talca, se encuentra este tramo de pavimento de hormigón construido en 1993, el cual tiene un espesor de 22 cm sobre 20 cm de base tratada con cemento y losas de 4 m x 3.5 m y juntas desviadas. El alabeo de construcción en esta área en particular equivale en promedio a -15°C (Poblete 1989). Históricamente el agrietamiento de las losas es bastante alto. Para conservar en buen estado el pavimento, se han reemplazado losas, las cuáles han tenido un desempeño variable, durando 1 a 2 años antes que se vuelvan a agrietar. Las razones para este agrietamiento prematuro son el alto tráfico (50.000.000 de Ejes Equivalentes para 15 años), un alto alabeo de construcción y la rigidez de la base.

Se utilizó un diseño TCP para resolver el problema para la pista de alto tráfico. El diseño fue el siguiente:

- Remover la losa existente sin dañar la base tratada con cemento
- 6 cm de base asfáltica (para completar los 22 cm de las losas existentes)
- 16 cm de un hormigón de 5,3 MPa de resistencia a la flexotracción

Los análisis de esfuerzos con ISLAB2000 para ambas geometrías se pueden ver en la Figura 11 donde las losas de 22 cm tuvieron un esfuerzo máximo de 29.9 kg/cm^2 y el diseño TCP una tensión máxima de 22.6 kg/cm^2 . Esto explica el mejor desempeño hasta el momento de las losas TCP con 6 cm menos de espesor.

5.3 5th Road Talca (Chile)

In the 5th Road (Talca) this concrete pavement road section was built in 1993, which has a thickness of 22 cm laid on a 20 cm concrete treated base with slabs of 4 m x 3.5 m and diverging joints. Construction curling in this particular area is equivalent to an average of -15°C (Poblete 1989). Historically, slab cracking has been quite high. In order to maintain pavement in good conditions, slabs have been replaced, which have had a variant behavior, from 1 to 2 years before cracking once again. Reasons for this premature cracking are high traffic volume (50,000,000 EA for 15 years), high construction curling and base's stiffness.

A TCP design was employed to solve this condition on a high traffic volume lane. The design was the following:

- *Removing existing slab without damaging cement treated base*
- *Laying 6cm of asphaltic base (to complete 22 cm of existing slabs)*
- *Laying 16 cm of concrete with 5,3 MPa flexo-tensile strength*

The stress analyses developed by ISLAB2000 for both slab geometries are seen on Figure 11, where 22 cm-slabs yielded a maximum stress of 29.9 kg/cm^2 and, TCP design had a maximum stress of 22.6 kg/cm^2 . So far, this explains the better performance developed by TCP slabs with 6 cm thickness reduction.

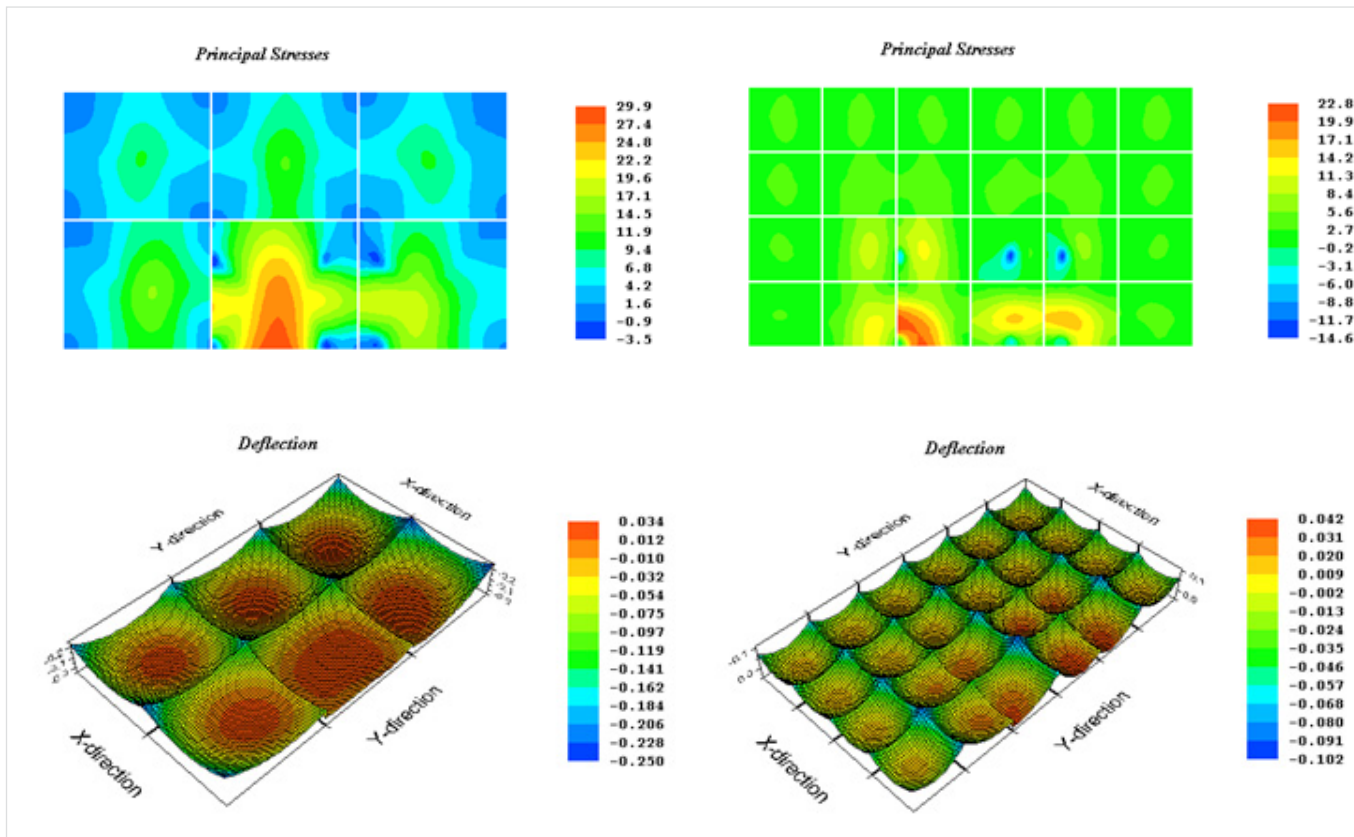


Figura 11. Tensiones para un pavimento de 22 cm de espesor, 4 m largo y 3,5m ancho (29,9 kg/cm²) y losas TCP® con 16 cm de espesor y 2 m largo (22,8 kg/cm²)

Figure 11. Tensile stresses for a pavement of 22 cm thickness, 4 m length and 3.5 m width (29.9 kg/cm²) and TCP® slabs with 16 cm thickness and 2 m length (22.8 kg/cm²)

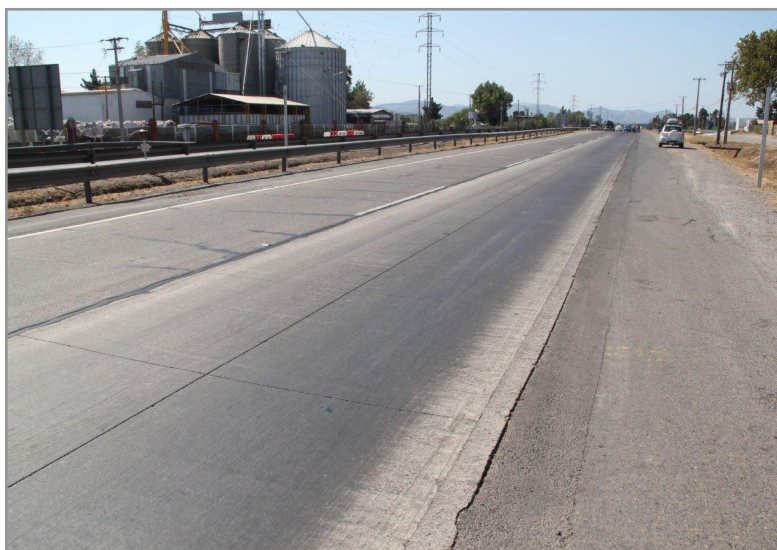


Figura 12. Ruta 5, 16 cm de hormigón, diseño TCP para 50.000.000 EE (2,5 años en uso)
Figure 12. 5th Road, 16 cm of concrete, TCP design for 50,000,000 EA (2.5 years in service)

6. Conclusiones

Se ha introducido un nuevo y revolucionario método de diseño el cuál optimiza las dimensiones de las losas de hormigón para minimizar el espesor requerido. Con estas losas cortas de entre 1,4 y 2,5 m, la tensión máxima se ha reducido considerablemente, dado que solo un set de ruedas se encuentra cargando cada losa. Con este nuevo concepto de diseño las losas pueden ser diseñadas con espesores de apenas 8 cm de espesor para vías de bajo tránsito de camiones sobre base granular. Esto permite una reducción en el espesor de entre 4 y 10 cm en comparación con pavimentos de hormigón diseñado por el método AASHTO tradicional, reduciendo el costo de construcción en aproximadamente un 20% del costo inicial, con una vida de diseño similar. Al comparar con una solución de asfalto, el ahorro es similar. Debido a que las losas son más cortas, las condiciones climáticas son menos importantes ya que el alabeo es menor y la transferencia de carga aumenta en comparación con pavimentos de diseño convencionales de 4,5 m de largo. Por lo tanto el desempeño de pavimentos en condiciones climáticas extremas es mejor que en losas convencionales (4,5m).

El software de Optipave fue diseñado basado en un modelo de elementos finitos y el input del diseño son losas cortas. El software fue calibrado gracias a los resultados obtenidos en una prueba realizada en Illinois y ha predicho de gran forma el desempeño de pavimentos construidos hace 7 años para diferentes tráficos y en diferentes climas. El software toma en consideración las capas de los suelos, el clima, propiedades del hormigón, tráfico, calidad de la construcción (gradiente equivalente de construcción), nivel de confianza y entrega el espesor de diseño, el IRI y el escalonamiento durante la vida de diseño. También cuenta con análisis de sensibilidad para espesor, tráfico, resistencia del hormigón y rigidez del suelo.

En Chile se han construido pavimentos desde 8 hasta 22 cm de espesor y se han comportado según lo esperado en el diseño, para el tráfico que han tenido. En Perú hay estacionamientos, estaciones de buses, centros de distribución, pavimentos industriales y todos con un desempeño aceptable y con un costo total inicial menor que los proyectos originales. En Guatemala existen más de 700 km-pista de pavimentos de hormigón para tráficos pesados y se han comportado según lo estimado, sin escalonamiento y un incremento muy bajo de IRI con mas de 6 años. En total se han construido más de 3 millones de metros cuadrados de pavimentos de hormigón con el sistema de geometría optimizada.

La tecnología TCP® (Thin Concrete Pavements), el método de diseño, el software OptiPave® y construcción de losas delgadas de concreto perfeccionadas para uso en pavimentación y demás derechos relacionados con dicha tecnología (software, know-how, secretos industriales, marcas comerciales, manuales, instructivos, etc.), son de propiedad exclusiva de Comercial TCPavements Ltda. y están protegidos por las leyes y tratados internacionales vigentes en materia de Propiedad Industrial e Intelectual, en particular la patente industrial No 44820 en Chile, patente n° 7.571.581 en Estados Unidos, Peru N°5940, solicitud internacional PCT/EP2006/064732,. ©TCPavements 2005-2012, registro de propiedad intelectual N°166311, todos los derechos reservados.

6. Conclusions

A new and revolutionary design method has been introduced, which optimizes concrete slab dimensions to minimize required thickness. These short slabs between 1.4 and 2.5 m have considerably reduced the maximum tensile stress, because only one wheel set is loading each slab. With this new design concept, slabs can be designed considering a thickness of only 8 cm for low trucks traffic roads on a gravel base. This allows a thickness reduction between 4 and 10 cm in comparison to concrete pavements designed by the traditional AASHTO method, thus reducing construction investment in about 20% less than the initial cost with a similar design life span. When comparing an asphalt solution, saving percentage is quite similar. Because slabs are shorter, weather conditions are less significant provided that curling is lower and the loading transfer is increased in comparison to conventional design pavements of 4.5 m length.

The OptiPave software was designed based on a finite element model and the design input corresponds to short slabs. The software was calibrated with results obtained from a test executed in Illinois, which has forecasted to a great extent the performance of pavements built 7 years ago for different traffic volumes and weather conditions. The software takes into consideration soil layers, weather conditions, concrete properties, traffic volume, construction quality (construction equivalent gradient), and reliability level and; it provides design thickness, IRI and step faulting during design life span. It also has a sensibility analysis for thickness, traffic volume, concrete resistance and soil stiffness.

In Chile, pavements have been constructed with thicknesses from 8 to 22 cm, which behavior is in accordance to design expectations for the traffic volume they have endured. In Peru there are parking lots, bus stations, distribution centers and industrial pavements, all of them delivering an acceptable performance and having an initial total cost lower than original projects. In Guatemala there are more than 700km-concrete pavement roads for heavy traffic volume and they have demonstrated a good behavior, without step faulting and showing a quite low IRI increase for more than 6 years. In total more than 3 million square meters of concrete pavements have been constructed using he optimized slab geometry system.

TCP® technology (Thin Concrete Pavements), OptiPave®, and the construction of optimized thin concrete slab for pavement purposes and other rights related to such technology (software, know-how, trade secrets, commercial brands, manuals and guidelines, etc) are of exclusive property of Commercial TCPavements Ltd., and they are protected under the laws and international treaties in force for Industrial and Intellectual property rights, specifically the industrial patent Nr. 44820 in Chile, patent Nr. 7.571.581 in the United States, patent Nr. 5940 in Peru, and international application PCT/EP2006/064732,. ©TCPavements 2005-2012, intellectual property record Nr. 166311, all rights reserved.

7. Referencias/References

- AASHTO (1993)**, Guide for Design of Pavement Structures
- ARA Inc. (2007)**, Interim Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide Manual of Practice. Final Draft. National Cooperative Highway Research Program Project 1-37A.
- BORDELON A., ROESLER J.R., y HILLER J.E. (2009)**, Mechanistic-Empirical Design Concepts for Jointed Plain Concrete Pavements in Illinois, Final Report, FHWA-ICT-09-052, Illinois Center for Transportation, University of Illinois, Urbana, IL, July 2009, 255 pp.
- CERVANTES V. y Roesler J.R. (2009)**, Performance of Concrete Pavements with Optimized Slab Geometry, Final Report, FHWA-ICT-09-053, Illinois Center for Transportation, University of Illinois, Urbana, IL, August 2009, 112 pp.
- CONTROLES Y MEDICIONES SA (2006)**, Reporte Evaluación de la calidad de la superficie del pavimento, Guatemala 2006
- COVARRUBIAS T. J. P., Andahur D. (2006)**, Análisis del Comportamiento de Pavimentos Delgados en Condiciones de Carga Pesada. Modelación con Software de Elementos Finitos ISLAB 2000, Enero, 2006
- COVARRUBIAS T y COVARRUBIAS V. (2008)**, TCP Design for Thin Concrete Pavements, 9th International Conference on Concrete Pavements, San Francisco, CA, 13 pp.
- COVARRUBIAS V. JUAN PABLO (2009)**, Optipave v 3.0
- COVARRUBIAS V. JUAN PABLO, COVARRUBIAS, T y ROESLER, J.R. (2010)**, Design of concrete slabs with optimized geometry, Sevilla
- EISENMANN, J. y G. LEYKAUF (1990b)**, Simplified Calculation of Slab Curling Caused by Surface Shrinkage, Proceedings of the 2nd International Workshop on the Theoretical Design of Concrete Pavements, Siquenza, Spain, pp. 185-197.
- ERES CONSULTANTS, ISLAB (2000)**, Finite Element Program for the Analysis of Rigid Pavements, Version 1.1, USA, 1999.
- HILLER JACOB E. (2007)**, Development of Mechanistic-Empirical Principles for Jointed Plain Concrete Pavement Fatigue Design, University of Illinois, Ph.D thesis, Urbana, IL.
- HILLER J.E. y ROESLER, J.R. (2005)**, Determination of Critical Concrete Pavement Fatigue Damage Locations Using Influence Lines, ASCE Journal of Transportation Engineering, Vol. 131, No. 8, pp. 599-607.
- KOHLER E. (2010)**, Mediciones de IRI y Escalonamiento, Pavimentos de Losas Cortas, Guatemala, Dynatest Chile
- LARRAIN C. (1985)**, Análisis Teórico-Experimental del Comportamiento de Losas de Hormigón de Pavimentos, MSc Thesis, School of Engineering, Catholic University of Chile, 1985, 280 pp.
- RAO C.B., BARENBERG E.J., SNYDER M.B. y SCHMIDT S.K. (2001)**, Effects of Temperature and Moisture on the Response of Jointed Concrete Pavements. Proc. 7th International Conference on Concrete Pavements, Vol. 1, Orlando, FL, 23-38.