

ANEXO CALCULO ESTRUCTURA DE PAVIMENTO

MEMORIA DE CÁLCULO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS CON PLACA-HUELLA EN CONCRETO REFORZADO TOMADO DE LA “GUIA DE DISEÑO DE PAVIMENTO CON PLACA HUELLA”.

Por

Juan Manuel Mosquera Rivera

Armando Orobio Quiñones

Juan Carlos Orobio Quiñones

Febrero 2016

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	3
1. Situación actual de la Placa-Huella en Colombia.....	4
2. Descripción del modelo.....	5
3. Determinación de la carga aplicada a la placa-huella.....	6
3.1. Factores de mayoración de cargas.....	6
3.2. Vehículo de diseño	7
3.3. Carga por peso propio	8
4. Caracterización del soporte de la placa huella	9
5. Resultados de la evaluación del modelo del pavimentos en placa-huella	10
6. Comparación con la situación actual de la placa-huella en Colombia.	12
7. Conclusiones y recomendaciones.....	12
8. Referencias.....	13

INTRODUCCIÓN

La Placa-huella es un sistema de pavimentación para vías de bajos volúmenes de tránsito, en el cual se pavimenta en concreto con refuerzo continuo únicamente la franja por la que circulan las ruedas de los vehículos (Fotografía 1). Las placas son conectadas entre sí con una riostra en concreto reforzado que une las dos placas y las berma cunetas, con el fin que estas funcionen monolíticamente. Los espacios entre las placas-huella, las riostra y las berma cunetas se rellenan con una capa de concreto ciclópeo del mismo espesor de la Placa-huella. Los pavimentos en placa-huella se consideran una alternativa económica para redes terciarias y secundarias con bajo volumen de tránsito.



Fotografía 1. Placa - Huella en concreto (Fuente: Alcaldía de Sibaté)

Debido a la creciente utilización de pavimentos en placa-huella en la red vial nacional en los últimos años, lo cual ha permitido mejorar la superficie de rodadura y reducir costos de mantenimiento de vías terciarias en muchas regiones del país, el Instituto Nacional de Vías contrató mediante concurso de méritos al Consorcio Manuales y Guías Ceal, conformado por las firmas El Alcarzár SAS, Compañía de Consultoría y Construcciones Ltda y Vías Alfa E.U., para la elaboración de una **Guía de Diseño de Pavimentos con Placa Huella**. Dentro de los requisitos contractuales se requiere un periodo de diseño de 20 años para los pavimentos en placa-huella y la estandarización de esta tecnología para un mejor uso en Colombia. En este artículo presentan los análisis realizados para el cálculo estructural de

los pavimentos en placa-huella y se suministran recomendaciones para la construcción de este tipo de pavimentos.

1. Situación actual de la Placa-Huella en Colombia.

A pesar del auge que actualmente tienen los pavimentos en placa-huella, que son construidos por la subdirección de red terciaria del Instituto Nacional de Vías - INVIAS, gobernaciones de departamentos y alcaldías municipales, actualmente no existe una guía de diseño y construcción para este tipo de pavimentos. La información más estructurada que se encuentra disponible es la especificación particular 500 – 1P [1] de la cual se desconoce su origen, no existe mayor información y al parecer no es una especificación oficial del INVIAS, sin embargo se ha venido utilizando en ausencia de una mejor especificación.

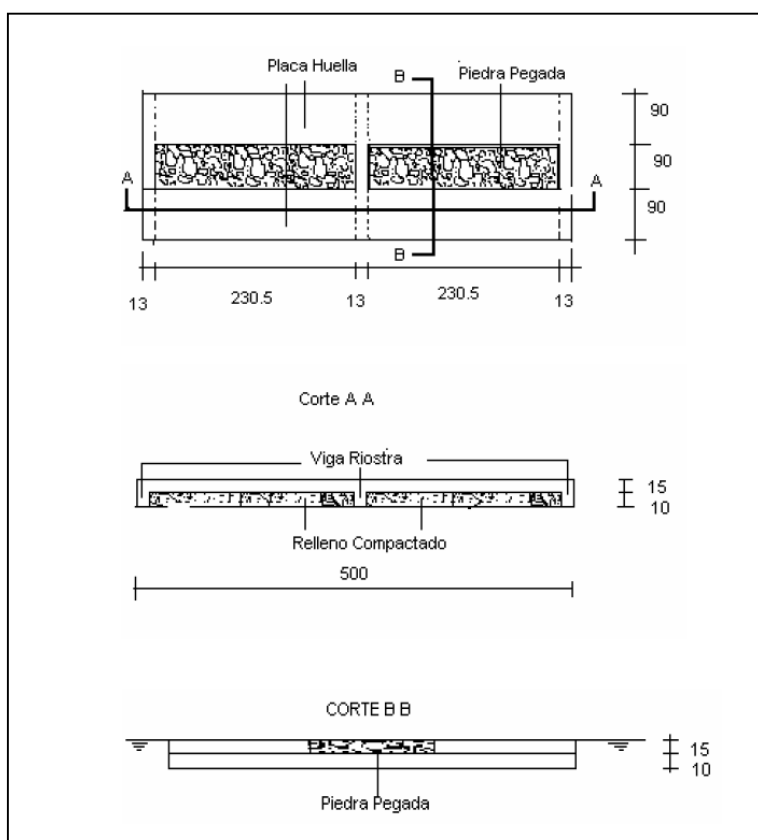


Figura 1. Geometría de Placa-huella de la especificación 500-1P

En la Figura1 se muestra la geometría de los pavimentos en placa-huella según la especificación 500-1P, el pavimento consiste en dos placas-huella paralelas en concreto reforzado. La figura muestra placas-huella en concreto reforzado de 0.90 mt de ancho y 5.0 mt de longitud, con riostras reforzadas en los extremos y en el centro de la longitud, con

sección de 0.13 mt x 0.25 mt. La placa-huella tiene un espesor de 0.15 mt y está apoyada sobre un material de afirmado de 0.10 mt de espesor que suministra un adecuado soporte a la placa-huella. El refuerzo está definido como una armadura de acero, en dos direcciones, con barras #2 (1/4") separadas cada 30 cm. Las riostras requieren dos aceros #3 (3/8") en la parte superior, la misma cuantía de refuerzo en la parte inferior y estribos de 1/4" cada 20 cm.

Sin embargo, no se conocen memorias de cálculo, no se sabe con qué criterios de carga se llegó al diseño propuesto, ni cuáles fueron las condiciones geotécnicas consideradas para el soporte. Una gran duda es si con las características actuales, los pavimentos en placa-huella están en capacidad de tener un buen desempeño durante un periodo de 20 años, con las cargas vehiculares esperadas.

En la práctica, cuando se revisan proyectos construidos, se encuentran modificaciones a lo dispuesto en la especificación 500-1P, se incrementa el espesor de la placa-huella pero con las mismas cuantías de acero de refuerzo, se aumentan las dimensiones de las riostras, se varían los espesores de material de soporte, etc. Cambios del lado de la seguridad, seguramente debidos a la falta de información de los criterios que dieron origen al diseño presentado en la especificación 500-1P, pero que se hacen con poco rigor técnico-científico, debido a que no se analiza el comportamiento de la placas-huella con consideraciones de geometría, cargas de tránsito, capacidad de soporte del suelo y clima.

En la presente investigación se analizó el comportamiento de los pavimentos de placa- huella con losas continuamente reforzadas, el análisis se realiza mediante un modelo de elementos finitos para evaluar la respuesta de las placa-huella a las cargas críticas del tránsito, con diferentes calidades de apoyo para determinar la respuesta de las placas y proponer diseños que se ajusten a las condiciones de uso nacionales. Al final se realizan comparaciones con la especificación 500-1P y se hacen recomendaciones constructivas.

2. Descripción del modelo

Para efectos de poder determinar los esfuerzos y deformaciones que se presentan en cada uno de los elementos del pavimento en placa-huella se estructuró un modelo de elementos finitos de una Placa Huella con riostras separadas cada tres metros (Figura 2). El modelo consistió en 7 módulos de 3.0 mt cada uno, con el fin de representar la continuidad de la

estructura, las cargas se ubicaron en el modulo central, el cual a su vez se dividió con diferentes nodos internos para poder determinar los esfuerzos máximos generados por el paso del vehículo de diseño. El modelo consideró que la placa huella se encuentra apoyada sobre una capa granular continua de soporte.

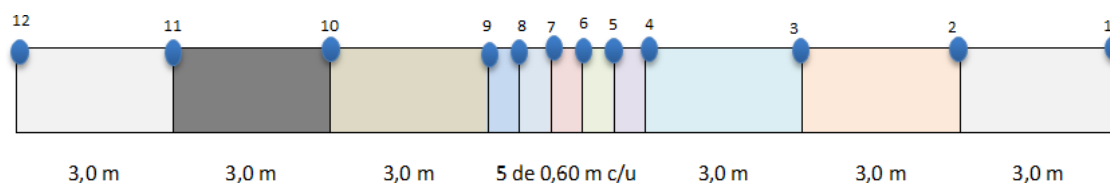


Figura 2. Geometría de Placa-huella de la especificación 500-1P

Los nodos del modelo se dividieron en tres tipos:

- Nodos externos (1, 2, 3, 10, 11 y 12) los cuales tienen como función representar la continuidad de la estructura.
- Nodos internos-externos (9, 4) que son los extremos del tramo cargado
- Nodos Internos (8, 7, 6 y 5) los cuales corresponden a puntos de ubicación de las cargas.

3. Determinación de la carga aplicada a la placa-huella

Con el fin de brindar un grado adecuado de confiabilidad al modelo planteado, las cargas fueron mayoradas para garantizar que los supuestos del modelo se cumplirán durante la fase de operación de la placa huella, teniendo en cuenta que las inversiones en pavimentación de vías son cuantiosas y que se trata de la elaboración de una guía de diseño de aplicación general, se considera que el grado de confiabilidad debe ser alto.

3.1. Factores de mayoración de cargas

Para obtener un grado de confiabilidad alto, la determinación de las cargas a considerar en el diseño de pavimentos con placa-huella debe minimizar las posibilidades de falla por incertidumbre en la estimación de cargas. Ante la poca información existente sobre factores de mayoración de cargas para el diseño de pavimentos reforzados, se toma la recomendación de Arango-Londoño [2], que recomienda la utilización de los siguientes factores de mayoración:

- Factor de mayoración para carga muerta 1.50
- Factor de mayoración para carga viva 1.75

3.2. Vehículo de diseño

Los pavimentos en placa huella son utilizados para vías de bajos volúmenes de tránsito en vías de la red terciaria y secundaria. Los vehículos de mayor peso que se espera circule por este tipo de vías corresponden al camión C3, el cual tiene un eje simple de rueda simple adelante (SRS) y un eje tándem atrás (Figura 3). Los pesos máximos para estos ejes están regulados por la resolución 004100 del 2004 del Ministerio de Transporte [3], por lo cual se usa el peso máximo permitido para efecto de los análisis en el presente estudio. La distribución de cargas entre los lados del eje se consideró del 50%. En pavimentos de placa-huella cada una de las huellas soporta un lado del eje (semieje).

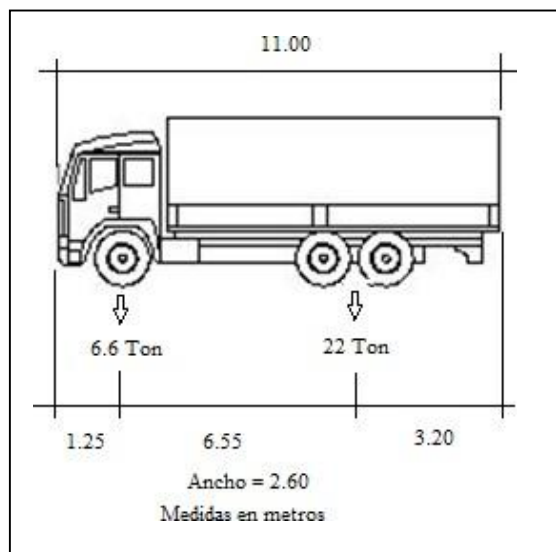


Figura 3. Pesos y dimensiones del vehículo de diseño – C3 (Mintransporte, 2004)

El camión C3 en su eje trasero tiene un eje tándem compuesto por dos ejes simples de rueda doble, separados 1,2 metros entre centros, con el fin de representar de manera más real la aplicación de esta carga, se considera una distribución uniforme entre las ruedas del semieje, como se muestra en la Figura 4.

Con el factor de mayoración de carga viva definido anteriormente, la carga viva a utilizar para cada rueda corresponde a 96.3 kN (9,63 Ton), para efecto de simplicidad se adoptó una carga de diseño 95 kN para cada rueda del semieje tándem.

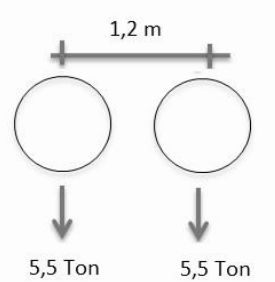


Figura 4. Distribución de carga en el semieje tándem del camión C3 (Fuente: Los Autores)

3.3. Carga por peso propio

Las cargas derivadas del peso propio corresponden únicamente al peso del concreto que conforma la placa-huella y la riostra, estas cargas se determinan a partir de la siguiente expresión:

$$\text{Carga} = \text{Factos de mayoración} * \text{Volumen} * \text{Peso específico del concreto.}$$

– **Determinación de la carga por peso propio de la riostra**

Se considera un elemento cuadrado de 20 cm de ancho, 20 cm de alto y una longitud de 90 cm, correspondiente al ancho de la placa-huella. El peso propio mayorado de la riostra corresponde a 1,3 kN.

– **Determinación de la carga por peso propio de la placa-huella**

Para la carga por peso propio de la placa-huella varía dependiendo de la ubicación de la losa y el tipo de nodo que le corresponda dado que la longitud de placa que contribuye al peso que soportará cada nodo varía de la siguiente manera:.

- **Nodos externos**

La longitud de placa corresponde a 3.0 metros y su peso propio mayorado es de 14,6 kN.

- **Nodos internos-externos**

La longitud de placa corresponde a 1,5 metros y su peso propio mayorado es de 7,3 kN.

- **Nodos internos**

La longitud de placa corresponde a 0,60 metros y su peso propio mayorado es de 2,90 kN

4. Caracterización del soporte de la placa huella

De acuerdo con la experiencia existente en la construcción de los pavimentos en Placa- huella reforzada, se considera que estos pavimentos tienen una superficie de soporte conformada por una capa de material granular de subbase apoyada sobre la subrasante, esta capa brinda un apoyo uniforme a la placa permitiendo la disminución de esfuerzos y deformaciones.

Para efectos de determinar la calidad del apoyo se empleó la siguiente correlación del CBR con el módulo de reacción de la subrasante (ecuación 1) [4]. Con base en la ecuación 1 y las correlaciones de la PCA [5] entre el módulo resiliente y módulo de reacción de la subrasante se construyó la Tabla 1.

$$R_r = 1500(R_{CBR}) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde,

R_r : Módulo resiliente de la subrasante en psi

R_{CBR} : Capacidad de soporte de la subrasante

Tabla 1 Correlación entre el módulo de reacción de la subrasante y el CBR del suelo

CBR	Mr [PSI]	K [PCI]	K [kN/m³]
3	4,500	100	27,130
4	6,000	132	35,812
5	7,500	143	38,796
6	9,000	152	41,238
7	10,500	161	43,679
8	12,000	178	48,291
9	13,500	193	52,361
10	15,000	200	54,260

El aporte de la capa granular se estableció a partir de la correlación recomendada por la PCA mostrada en la Tabla 2, que considera el efecto sobre el módulo de reacción de una subbase sin tratar colocada sobre la subrasante [5].

Tabla 2. Módulo de reacción del conjunto Subrasante - Subbase [kN/m³] (modificada de Huaung, 2004 [6])

K subrasante [kN/m ³]	Espesor de subbase en (m)			
	0.10	0.15	0.22	0.30
13,565	17,635	20,348	23,061	29,843
27,130	35,269	37,982	43,408	51,547
54,260	59,686	62,399	73,251	86,816
81,390	86,816	89,529	100,381	116,659

De acuerdo a lo anterior para una subrasante con un CBR de 3.0 y una subbase granular de 0.15 mt, el módulo de reacción del conjunto subrasante-subbase corresponde a 37,982 kN/m³.

5. Resultados de la evaluación del modelo del pavimento en placa-huella

Con el fin determinar los momentos de la placa-huella para evaluar los requerimientos del acero de refuerzo se evaluó el modelo de elementos finitos con los siguientes parámetros:

- Ancho de banda: 0.90 mt (ancho de la Placa-huella)
- Módulo de elasticidad del concreto $2.1 * 10^6$ kN/m²
- Módulo de reacción del soporte 37,982 kN/m³
- Momento de inercia del cimiento $2.53125 * 10^{-4}$

En las Figuras 5 y 6 se presentan las deformaciones y momentos de la placa-huella resultantes de las cargas aplicadas por el paso de un camion C3 y el peso propio del pavimento en placa-huella.

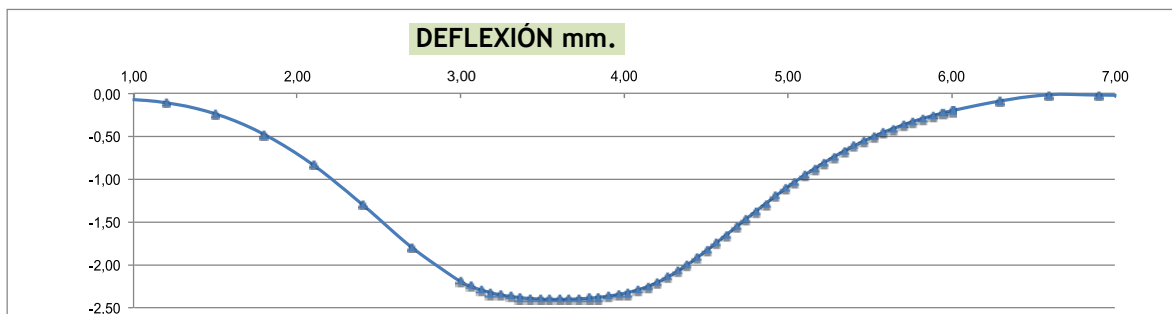


Figura 5. Deflexiones en la Placa Huella

La Figura 6 muestra que el momento máximo que se presenta en la placa huella corresponde a 18.4 kN-m. Una placa huella de 0.15 mt de espesor con un refuerzo centrado de una barra corrugada # 4 cada 15 cm, tiene una capacidad por momento de 20.5 kN-m. En consecuencia, este es el refuerzo recomendado debido a que la capacidad supera

levemente el momento calculado. Adicionalmente, una separación de 15 cm suministra una adecuada distribución de esfuerzos a lo ancho de la placa-huella.

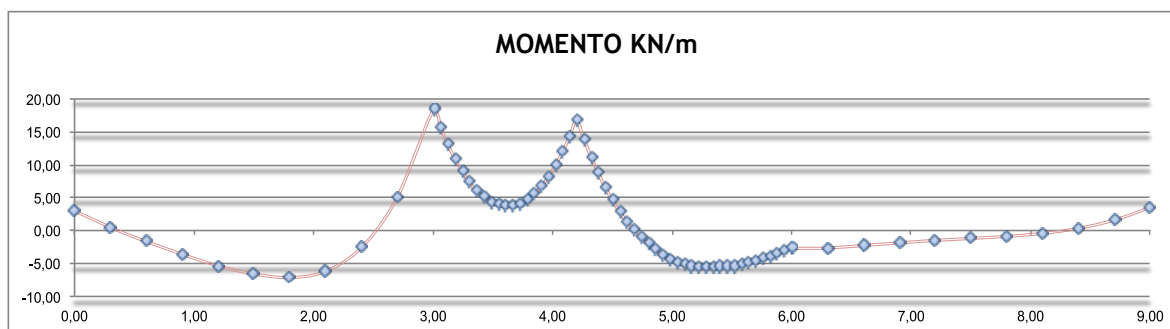


Figura 6. Momentos en la placa-huella

En el caso de elementos de concreto reforzado, con elementos de concreto que están en interacción con el suelo, se recomienda un recubrimiento mínimo de 7.5 cm. Un espesor de 0.15 mt para los pavimentos en placa-huella es el espesor mínimo aceptable que garantiza el recubrimiento mínimo, colocando el refuerzo en el eje central longitudinal, lo que permite contribuir a absorber los momentos negativos y positivos que se presentan en la placa.

Con el fin de fijar el acero de refuerzo longitudinal se recomienda la colocación de acero transversal con barras # 2 cada 30 centímetros, con el propósito fijar el acero longitudinal, evitar desplazamientos durante la construcción y permitir una mejor distribución de esfuerzos transversalmente.

En caso de requerirse placas-huellas con ancho superior a los 90 cm, por ejemplo en los sobrehanchos de la curvas, se debe conservar el mismo acero de refuerzo, con igual distribución que en las placa-huellas de 0.90 mt de ancho. Las berma-cunetas por ser elementos que pueden estar sometidos a las mismas cargas que la placa-huella deberán tener un refuerzo similar al de estas.

La riostras son elementos cuya función es confinar la subbase y garantizar que las placas huellas trabajen monolíticamente, las mismas están sometidas a esfuerzos bajos, por lo que se recomienda la colocación de la cuantía mínima de refuerzo para estos elementos que corresponde a 4 barras #4 longitudinalmente (dos arriba y dos abajo) y estribos #2 cada 15 centímetros.

6. Comparación con la situación actual de la placa-huella en Colombia.

La comparación directa entre la estructura recomendada por la especificación 500-1P y la recomendada en el presente estudio no puede realizarse con exactitud debido a que no se conocen los parámetros de diseño tenidos en cuenta para el cálculo de la estructura de la especificación 500-1P, no se conoce el vehículo de diseño, ni la capacidad de soporte de la subrasante, parámetros determinantes en la capacidad estructural del pavimento propuesto. Al comparar la geometría y los requerimientos de acero de refuerzo de ambas estructuras, se encuentra que son menores las requeridas por la especificación 500-1P, esto hace presumir que el vehículo de diseño pudo ser inferior al vehículo C3, generando gran incertidumbre ante el requerimiento actual de que el pavimento soporte este tipo de vehículo.

7. Conclusiones y recomendaciones

Los análisis se realizaron con superficie de apoyo con un módulo de reacción del conjunto de 37,982 kN/m³, que corresponde a una subrasante con CBR de 3.0 y una subbase granular de 0.15 mt de espesor. Durante el proceso constructivo se debe garantizar el cumplimiento de estas condiciones mínimas, las cuales deben mantenerse durante el periodo de servicio del pavimento para garantizar la durabilidad del mismo. Tanto la subrasante como la subbase deben ser debidamente compactadas. Se debe garantizar el confinamiento de la subbase por parte de la riostra y el bordillo, por lo que estos elementos deberán proyectarse por debajo de la placa, como mínimo hasta alcanzar una profundidad igual al espesor de la subbase (15 cm).

El efecto de una mejora en la calidad del soporte de la placa-huella representa una leve disminución en los esfuerzos, deformaciones y momentos que se presenta en los pavimentos de placa-huella reforzada, se recomienda que esta disminución de esfuerzos se considere un factor de seguridad y no se reduzcan las cuantías del refuerzo.

Las cuantías de refuerzo propuestas son muy cercanas a la cuantía mínima requerida por el pavimento. La reducción la cuantía de refuerzo implicaría un incremento en el espaciamiento de las barras #4, dado que con barras #3 la estructura no podría resistir las solicitaciones de la carga de diseño utilizada en el análisis, esto no sería conveniente porque se afectaría la distribución de esfuerzos a lo ancho de la placa-huella.

Las juntas de construcción de la placa-huella deben hacerse a un tercio de la longitud de la misma, medido desde la riostra y en ese punto se permite traslapo de máximo el 50% del refuerzo longitudinal. La Junta de construcción de la riostra debe hacerse a 30 cm del punto donde termina la placa-huella, en este punto se permite traslapo de máximo el 50% del acero longitudinal.

8. Referencias

- [1] Anonimo, Especificación 500-1P Placa-huella en concreto.
- [2] J. F. Arango-Londoño, Diseño de pavimentos reforzados: evaluación de factores de carga y subresistencia por el método LRFD, *Tecno Lógicas*, n° 14, pp. 89-103, 2005.
- [3] Ministerio de Transporte, Límites de pesos y dimensiones de los vehículos de carga en Colombia, Resolución 004100 Ministerio de Transporte, Bogotá DC, 2004.
- [4] W. a. A. K. Heukelom, Dynamic testing as a means of controlling pavements during and after construction,» *International conference on the structural design of asphalt pavements*, vol. 203, n° 1, pp. 667-685, 1962.
- [5] R. G. Packard, Thickness design for concrete highway and street pavements, *Portland Cement Association*, 1984.
- [6] Y. H. Huang, Pavement Analysis and Design, Pearson/Prentice Hall, 2004.