

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

Aplicación de efecto de berma en el diseño de losas de concreto para el pavimento de calzadas
exclusivas del sistema de Transmilenio en Bogotá

Liliana Fernanda Gutiérrez Colón

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniera Civil

Dirigido por:

Carlos Iván Gutiérrez Guevara

Ingeniero Civil

Universidad Santo Tomás

Facultad de Ingeniería Civil

2022

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

Nota de aceptación

Director del Proyecto

Ingeniero Carlos Iván Gutiérrez Guevara

Jurado 1. Juan Miguel Sánchez Durán

Jurado 2. Mónica Yasmín Rueda Pinto

Agradecimientos

Desde el punto de vista de la utilidad y oportunidad del ejercicio de investigación adelantado en este trabajo, como autora lo considero irremplazable en mi formación como profesional, en diversos aspectos, desde la concepción, diseño, ejecución, redacción y presentación, teniendo en cuenta que es la introducción a formas más detalladas de participación en el desarrollo y adaptación de tecnología y de contribuciones a la ciencia que, seguramente, vendrán en el futuro y que, esperamos, contribuyan al anhelado desarrollo del país.

Por las oportunidades brindadas en él, y en el desarrollo de toda la formación en la ingeniería, extendo mis agradecimientos, en primer lugar, al dador de la vida, de la naturaleza, de la Física, y de todas las ciencias, que permitieron el desarrollo de la ingeniería a través de la inteligencia humanada: A Dios. El Dios de mis padres y mis mayores, el Dios que aprendí también a amar en las aulas de mi alma mater. A ella y sus directivas y docentes con quienes estaré toda la vida agradecida por acogerme en el claustro y enseñarme los principios éticos y científicos de la que empieza a ser mi profesión de vida.

A mis profesores Ingenieros Mónica Rueda Pinto y Juan Miguel Sánchez Durán quienes, aparte del apostolado de transmitir sus vivencias y conocimientos, de manera desinteresada y magistral constituyen ejemplo de vida y amor a la profesión y a nuestra sociedad pues todos los días aportan a su desarrollo y crecimiento con su constante aprendizaje y tránsito de semillas de creación a sus alumnos.

A mi familia, por la paciencia aportada en mi formación y por su continuo apoyo en mis fortalezas y debilidades que hoy permiten estar alcanzando otro escalón de mi formación personal y profesional.

A mi abuelo, Ingeniero Carlos Iván Gutiérrez Guevara fuente de inspiración, quién ha guiado mi proceso desde el inicio, educándome no solo hacia el conocimiento sino hacia una profesión basada en la ética, admiración y amor a la misma, siendo pocas las palabras para agradecer su presencia en mi vida y lograr que este sueño sea una realidad.

Tabla de contenido

Resumen	9
Abstract	11
Introducción	13
1. Objetivos	15
1.1. Objetivo general	15
1.2. Objetivos específicos	15
2. Formulación del problema	17
3. Justificación	20
4. Marco teórico	22
4.1. Antecedentes	22
4.2. Estado del arte	23
4.3. Marco conceptual	24
4.3.1. Pavimento rígido	24
4.3.2. Tipos de pavimento rígido:	25
4.3.3. Losa de concreto	25
4.3.4. Subbase	25
4.3.5. Subrasante	26
4.3.6. Berma	26
4.3.7. Efecto de berma	26
4.4. Esfuerzos y deformaciones en pavimentos rígidos	26
4.4.1. Esfuerzos producidos por alabeo	27
4.4.2. Esfuerzos producidos por aplicación de cargas	28
4.4.3. Cálculo de esfuerzos por fórmulas	28
2.5.3. Programa de análisis de esfuerzos Ever Fe	34
2.6. Tipos de daños en el pavimento rígido	34
2.7. Diseño de pavimentos rígidos	39
2.7.1. Metodologías de diseño de pavimentos rígidos	39
3. Metodología	45
3.1. Análisis porcentaje de tráfico sobre borde de losa (investigación de campo)	46
3.2. Diseño de estructuras de pavimento	53
3.3. Análisis estructural por medio de elementos finitos	60

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

Geometría.....	61
Material.....	62
Cargas	62
4. Resultados y análisis.....	68
4.1. Resultados.....	68
Tramo Autopista.....	68
Tramo Patio-Taller	73
4.2. Análisis de Resultados:.....	84
5. Conclusiones	92
6. Bibliografía.....	98

Imágenes

Imagen 1 Alabeo generado por cambios de la temperatura durante el día y efecto de la carga del tráfico.....	27
Imagen 2 Alabeo generado por cambios de la temperatura durante la noche y efecto de la carga del tráfico.....	28
Imagen 3 Esfuerzos por carga aplicada en la esquina de la losa.....	31
Imagen 4 <i>Ilustración de grieta de esquina</i>	35
Imagen 5 <i>Ilustración de grieta longitudinal</i>	35
Imagen 6 <i>Ilustración de grieta transversal</i>	36
Imagen 7 <i>Ilustración de grietas en bloque</i>	36
Imagen 8 <i>Ilustración de separación de juntas longitudinales</i>	37
Imagen 9 <i>Ilustración de baches</i>	37
Imagen 10 <i>Ilustración de escalonamiento de juntas</i>	38
Imagen 11 <i>Ilustración de bombeo</i>	38
Imagen 12 Troncal Avenida El Dorado.....	47
Imagen 13 Troncal Avenida El Dorado.....	48
Imagen 14 Troncal Avenida El Dorado.....	49
Imagen 15 Troncal Avenida Suba.....	49
Imagen 16 Troncal Autopista Norte.....	50
Imagen 17 Troncal Avenida Américas.....	51
Imagen 18 Recolección de datos en campo Troncal Caracas.....	52
Imagen 19 Diseño BS-PCAA de tramo Autopista con berma.....	58
Imagen 20 Diseño BS-PCAA de tramo Autopista sin berma.....	58
Imagen 21 Diseño BS-PCAA de tramo Patio-Taller con berma.....	59
Imagen 22 Diseño BS-PCAA de tramo Patio-Taller sin berma.....	59
Imagen 23 Geometría seleccionada para cada tramo de estudio.....	61
Imagen 24 Dimensiones de eje delantero direccional.....	63
Imagen 25 Dimensiones de eje delantero direccional.....	64
Imagen 26 Ubicación de carga eje delantero direccional en Tramo Autopista con berma.....	64
Imagen 27 Ubicación de carga eje delantero direccional en Tramo Autopista con berma.....	65
Imagen 28 Ubicación de carga eje delantero direccional en Tramo Autopista con berma.....	65
Imagen 29 Ubicación de carga eje delantero direccional en Tramo Autopista con berma.....	66
Imagen 30 Ubicación de carga eje delantero direccional en Tramo Patio Taller, con berma....	67
Imagen 31 Deformación de distribución de losas tramo Autopista con berma anclada para espesor de 30.....	80
Imagen 32 Deformación de distribución de losas tramo Autopista sin berma anclada para espesor de 30.....	80
Imagen 33 Deformación de distribución de losas tramo Autopista con berma anclada para espesor de 30 cm.....	82
Imagen 34 Deformación de distribución de losas tramo Autopista sin berma anclada para espesor de 30 cm.....	83
Imagen 35 Ilustración de estructura con berma anclada.....	86
Imagen 36 Ilustración de aumento de espesor en laterales de la losa.....	86

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

Imagen 37	Losa con sardinel integral.....	87
Imagen 38	Losa con bordillo integral y sobreancho.....	87
Imagen 39	Bandas sonoras.	88

Tablas

Tabla 1 Resultados trabajo de campo. Porcentaje de Camiones al Borde.	52
Tabla 2 Distribución de cargas por eje en buses articulados y biarticulados.	54
Tabla 3 Tránsito Autopista calzada exclusiva.....	55
Tabla 4 Tránsito en el interior del Patio-Taller.....	55
Tabla 5 Parámetros de diseño – Tramo Autopista	57
Tabla 6 Parámetros de diseño – Tramo Autopista	57
Tabla 7 Resultados dimensionamiento BS-PCAA.....	60
Tabla 8 Parámetros de concreto hidráulico aplicados en los modelos.	62
Tabla 9 Resultados esfuerzos y deformaciones máximos para tramo Autopista. Carga aplicada en el borde de la losa.....	68
Tabla 10 Resultados esfuerzos y deformaciones máximos para tramo Autopista. Carga aplicada en el centro de la losa.....	70
Tabla 11 Resultados esfuerzos y deformaciones máximos para tramo Autopista. Carga aplicada en la esquina de la losa.	71
Tabla 12 Resultados esfuerzos y deformaciones máximos para tramo Patio-Taller. Carga aplicada en el borde de la losa.	73
Tabla 13 Resultados esfuerzos y deformaciones máximos para tramo Patio-Taller. Carga aplicada en el centro de la losa.	75
Tabla 14 Resultados esfuerzos y deformaciones máximos para tramo Patio-Taller. Carga aplicada en la esquina de la losa.	76
Tabla 15 Resultados esfuerzos y deformaciones máximos para tramo Autopista con espesor constante de 24 cm.	79
Tabla 16 Resultados esfuerzos y deformaciones máximos para tramo Autopista con espesor constante de 30 cm.	81
Tabla 17 Comparación entre esfuerzos obtenidos de EverFe 2.24. y aplicación de ecuaciones Westergaard y Ioannides espesor de 24 cm	83
Tabla 18 Comparación entre esfuerzos obtenidos de EverFe 2.24. y aplicación de ecuaciones Westergaard y Ioannides espesor de 30 cm	84

Resumen

Se presenta en este documento, el resultado de una investigación con elementos teóricos, trabajo de campo, uso de técnicas de diseño y análisis con programas de cómputo, con aplicaciones a casos prácticos.

Está relacionada con el efecto de berma en el diseño y construcción de los pavimentos de concreto del Sistema Transmilenio en la ciudad de Bogotá. Estos pavimentos han permitido, en un ejercicio de más de 20 años, el desarrollo local de las técnicas de pavimentos para cargas pesadas, de un sistema masivo de transporte público con buses (BRT).

Los problemas de fallas de pavimentos rígidos en algunas de las primeras troncales de Transmilenio, condujeron a posiciones conservadoras por parte de diseñadores y entidades, orientadas a lograr diseños con mayores espesores, aplicando factores de seguridad y consideraciones particulares. En este caso, los términos de referencia de los últimos contratos de las entidades suelen exigir que no se considere el efecto de berma en los diseños, lo cual condice a espesores de losa adicionales entre 3 y 5cm, de los que se requerirían considerándolo.

El efecto berma tiene que ver con la magnitud de los esfuerzos y deformaciones que sufre la losa, los cuales son mayores si las cargas de llanta circulan por el borde de las losas, lo cual ocurre cuando no existen bermas. Los esfuerzos resultantes, de mayor magnitud, conducen a la exigencia de espesores mayores en 3 a 5cm, con incrementos en el volumen de concreto hasta de un 20%.

En el estudio se muestra el impacto en términos de esfuerzos, deformaciones y diseños prácticos, para casos particulares en la ciudad, y se señala que las fallas ocurridas en el pasado no están relacionadas con el efecto de berma, que no fue considerado en pavimentos exitosos que ya están cumpliendo la vida de diseño. También se indica que en el trabajo de campo no se encontró

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

que los vehículos de Transmilenio circulen por los bordes de las losas y que no hay evidencia alguna de fallas atribuibles a esfuerzos de borde.

Se formulan recomendaciones relacionadas con las experiencias en los pavimentos de la ciudad al respecto y se recomiendan nuevos temas de investigación relacionados.

Abstract

This document includes research results with theoretical elements, field work, design techniques application and computer analysis methods applied to practical cases.

It is related to the shoulder effect in the design and construction of concrete pavements for the Transmilenio System in Bogotá City. Those pavements allowed in a more than 20 years application, the local development of techniques for concrete pavements for heavy loads in a massive Public Transport systems with buses (BRT)

The failure issues of rigid pavements in some of the first urban trunk roads lead to conservative attitude from designers and officers, looking for thicker slab design, by the use of higher factors of safety and particular considerations. In this topic, the last contracts of the road development entities ask the no inclusion of the shoulder effect in designing, which lead to an increase of between 3 to 5 cm additional slab thickness.

Shoulder effect deals with stress magnitude and deformation in the concrete slab, which are increased if the bus wheels circulate along the edge of the slab, that is, in the condition of no shoulder effect consideration. Greater physical results lead to about 20% more volume of concrete.

In this study, the impact of stresses, deformations and design results are shown for particular practical cases. The origin of past issues in the city pavements, no related to shoulder effect is shown, given that many successful pavement projects in the TransMilenio system did not consider such condition. Also, it is pointed that, in the field work the current condition do not show vehicles circulating along the edges of the slabs and that there is not any evidence of failures by lack of lateral confinement.

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

Some concussions and recommendations are issued related to previous concrete pavement experiences in Bogotá and also suggestions of new topics for related research are included.

Introducción

Transmilenio es el sistema de transporte masivo en buses (BRT) de la ciudad de Bogotá D.C. capital de la República de Colombia que entró en servicio en el año 2000. Los vehículos que se utilizan poseen cargas especiales a la luz de la normatividad colombiana lo cual ha inducido una rápida evolución en la técnica de la Ingeniería de Pavimentos en el país, a raíz de algunas dificultades técnicas ocurridas

Durante la operación de Transmilenio, se han presentado diferentes situaciones referentes a la calidad y serviciabilidad de las calzadas exclusivas del sistema dado que, en algunas troncales diseñadas con pavimento rígido, las losas de concreto hidráulico instaladas fallaron en periodos cortos, si bien los daños que se observan pueden atribuirse a diversos factores como la calidad de los materiales utilizados, particularmente relacionados con su resistencia a la erosión o a defectos en el diseño de los elementos, también es posible que en su deterioro prematuro hayan confluído otras causas como no haber comprendido oportunamente, en su diseño o construcción el efecto de bermas; según la AASHTO “las bermas ancladas a la losa mejoran la transferencia de cargas, disminuyendo esfuerzos y deformaciones en la misma” (Darter, 1991).

De hecho, en los primeros diseños se evidencia que se consideró efecto de berma y las primeras vías troncales (Avenida Caracas, Autopista Norte, Calle 13, Avenida de las Américas y Avenida Ciudad de Cali, Sector de Patio Bonito) se construyeron con espesores de losa entre 20 y 24 cm. Después de los daños prematuros ocurridos en las Troncales Autopista Norte y Avenida Caracas, con la intención de prevenir el agrietamiento temprano de los elementos y la aparición de daños de esquinas y bordes de losa, se decidió no considerar efecto de berma al diseñar las calzadas, lo que genera un aumento de los espesores de las losas de manera que éstas soportarán mayor carga vehicular y más repeticiones. Al tiempo que menos deformaciones; sin embargo, esto requiere el uso de mayor volumen de concreto, mayores costos y espesores que han venido

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

evolucionando hasta llegar al orden de 30 a 32 cm en las últimas troncales, con otros problemas que no necesariamente implican ventajas del pavimento ni mayores durabilidades.

Por las razones expuestas anteriormente, este proyecto busca determinar la pertinencia de la aplicación del efecto berma descrito por metodologías de diseño de pavimento rígido, como AASHTO o PCA en el diseño de losas de concreto para las calzadas del sistema de Transmilenio, teniendo en cuenta, principalmente, el impacto económico que puede representar en las inversiones urbanas del país la necesidad de construir vías de mayor ancho o pavimentos de mayor espesor. Para lograrlo es necesario, principalmente, comprender desde la óptica de la técnica y la practicidad constructiva, las bases de la metodología ya mencionada y estudiar métodos alternativos que consideren el efecto de las bermas en el pavimento rígido; así mismo, se requiere reconocer los términos de referencia para diseño de pavimento rígido, que manejan el Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá (IDU) y la empresa de Transmilenio SA y además, por el método de observación, comparar el estado y comportamiento de vías en las que se emplee la berma y vías en las que no; finalmente, se busca determinar la utilidad de la construcción de calzadas con la consideración del efecto de la berma.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Realizar un estudio de la teoría de efecto de berma aplicada en las losas de concreto del pavimento para el sistema de Transmilenio en Bogotá, en relación con las costumbres del tráfico en la ciudad y las exigencias de las entidades encargadas del desarrollo vial y estudiar sus aplicaciones prácticas del concepto citado.

1.2. Objetivos específicos

- Establecer con claridad los fundamentos del análisis del comportamiento de un pavimento rígido con y sin berma, de manea que se aclare lo que significa desde el punto de vista físico y las alternativas de uso en la práctica.
- Identificar las metodologías que hacen referencia al efecto de berma y su desarrollo.
- Revisar, para los pavimentos rígidos de TransMilenio de la ciudad, de qué manera se ha empleado el criterio de berma y cuál ha sido el resultado en términos de estabilidad del pavimento.
- Observar, en campo, el recorrido típico de las llantas de los articulados en las losas en troncales que usan pavimento rígido, para lo cual se seleccionaron sitios de muestreo en la Autopista Norte, Avenida Caracas, Avenida de las Américas, Avenida Suba y Avenida El Dorado.
- Determinar la forma en que se controlan los temas de bermas y esfuerzos en diferentes métodos de diseño de pavimento rígido de uso en el país que son AASHTO (de naturaleza empírica) y PCA (de enfoque empírico-mecanicista).
- Obtener el dimensionamiento de estructuras de pavimento de concreto variando parámetros de diseño, por medio del software de diseño BS-PCAA, con el fin generar análisis de sensibilidad sobre casos típicos de estudio, que serán analizados posteriormente.

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

- Generar una metodología de análisis de elementos finitos para determinar esfuerzos y deformaciones, en relación con el efecto berma en las losas de concreto para cada uno de los casos mediante el software EverFe 2.24.

2. Formulación del problema

El esfuerzo que produce una carga situada en los bordes de una losa es mayor que si la carga estuviera en otros puntos. Si el espesor se fija para conservar el esfuerzo cerca del borde no soportado en un nivel seguro, el resto de la losa puede resultar sobrediseñado. Con el propósito de lograr que los esfuerzos de flexión sean iguales en todo el ancho de losa e impedir así el sobrediseño, inicialmente se concibieron pavimentos rígidos con espesor de losa mayor en el borde externo, y una transición de espesor hacia el interior, como resultado de la aparición de grietas paralelas al borde.

Así se construyeron los primeros pavimentos rígidos con ingeniería de la década del 20 en el siglo anterior, en territorio norteamericano (Bates 1921, Illinois, 1922), técnica en uso hasta alrededor de 1940, con cerca del doble de espesor en el borde y 2 pies de transición hacia el interior. Los trabajos de Westergaard (1926) mostraron que la física explicaba la razón de esas patologías por la ocurrencia de esfuerzos mayores con cargas de borde que con aplicaciones en el interior de las losas rígidas. Con el advenimiento de la mecanización de la construcción, las dificultades obvias de este sistema de construcción, y la aplicación de las teorías desarrolladas, permitieron extender el uso de aumentar el ancho de la calzada para evitar la circulación en el borde, manteniendo el mismo espesor.

Las vías en concreto fueron, desde entonces más anchas, dejando una “berma” sin tránsito, para que no se presentara el agrietamiento de borde externo. El tránsito de las llantas externas ocurrió hacia el interior de la losa, y se facilitó el proceso constructivo reduciendo, además los costos y demoras de construcción.

En el diseño de las calzadas exclusivas de TransMilenio (Sistema de Transporte Público de Buses de Tránsito Rápido) en la ciudad de Bogotá, se ha utilizado pavimento flexible y rígido; en los primeros esfuerzos de construcción, las dos opciones exhibieron problemas en cuanto a su rápido deterioro. Para entonces, las experiencias en pavimentos de concreto no eran muy

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

extendidas en la ciudad, y tampoco se tenía suficientemente claras las cargas que los buses aplicarían, dado que la idea se había importado de Curitiba, Brasil, con un escaso nivel de información técnica.

En el caso del pavimento de concreto hidráulico, el de mayor interés para el propósito de este trabajo de investigación, en la ciudad de Bogotá, el estado de las losas genera inseguridad e incomodidad para los usuarios, mayores tiempos de desplazamiento, desgaste acelerado del parque automotor, y mayor producción de gases contaminantes.

En búsqueda de soluciones para las nuevas construcciones de troncales, el IDU ha optado por reglamentar exigencias conservadoras en los pliegos contractuales en relación con los diseños, apuntando a lograr que los pavimentos de las nuevas troncales se construyan con espesores cada vez mayores. De hecho, en los términos de referencia del diseño de pavimentos rígidos para la nueva Troncal Avenida 68, al lado de los requerimientos normales de diseño por la Técnica PCA, se exige que no se considere Efecto de Berma, que el tránsito de diseño, en término de espectro de cargas, se afecte por un factor de 1,2 y que las capas de concreto asfáltico que se coloquen para control de erosión no se tengan en cuenta, para el cálculo del módulo de reacción del conjunto subrasante-subbase, en relación con su contribución estructural, entre otras especificaciones de corte conservador, que pretenden lograr que se construyan espesores importantes de losa.

Los espesores de losas de concreto para las troncales, entonces han evolucionado gradualmente, desde 20 o 21 cm de losas en las troncales de primera fase (Avenida Caracas y Autopista Norte), a 32 cm en la tercera fase (Carrera 10ª). De otra parte, las infraestructuras de los mismos pavimentos se han convertido en pavimentos flexibles con todas sus capas, sobre los cuales se desplantan las losas citadas. Una pregunta formal de algunos expertos es si la filosofía de tales exigencias de diseño va por el camino correcto, o la ciudad ha ejecutado inversiones mayores a las realmente necesarias. Y la otra pregunta obvia es si lo que está en discusión es la aplicabilidad del método de la “Portland Cement Association” (PCA) en las condiciones bogotanas

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

del sistema de TransMilenio o la necesidad de migrar hacia otras metodologías de análisis. El asunto tiene gran interés en Colombia, teniendo en cuenta que las técnicas y modificaciones que se implanten en la capital se extienden inmediatamente a todos los ámbitos del país.

El presente proyecto propondrá respuestas a las preguntas anteriores, a partir de resultados de análisis y discusiones técnicas, y generará investigación aplicada a las condiciones locales, en relación de uno de los aspectos ligados con posibles soluciones a los problemas de agrietamiento y fractura o fallas de las losas de concreto hidráulico del Sistema de transporte público local, por medio de observaciones directas en los corredores en operación, y análisis de esfuerzos y deformaciones. A partir de lo mencionado, se busca también dar respuesta a las preguntas: ¿Es posible disminuir la aparición temprana de fracturas en las losas de calzadas exclusivas de TransMilenio, a partir de la implementación de soluciones basadas en la teoría del efecto de berma? Y ¿tiene asidero técnico la exigencia de diseñar siempre los pavimentos rígidos de las vías bogotanas sin considerar el efecto de berma?

3. Justificación

En la ciudad de Bogotá, el método de transporte más utilizado es el Sistema de TransMilenio; por esta razón y con el fin de ofrecer un diseño seguro y duradero en sus términos de referencia han decidido no tener en cuenta el efecto de berma en el diseño de losas de concreto hidráulico, asegurando que hasta el 94% de las cargas que recibe la losa puedan ser aplicadas directamente sobre el borde de losa lo que permite generar esfuerzos controlando la aparición de deformaciones muy altas; por esta razón, se diseñan con espesores que pueden superar los 30 cm. Sin embargo, la cifra de articulados que circulan por el borde del elemento es mucho menor, por lo que este trabajo propone tener en cuenta el efecto de berma durante el diseño, en el que se pueda considerar que solo el 6% de las cargas afectan el borde que es donde se pueden presentar mayores deformaciones, obteniendo así menores espesores para las losas y obvias economías en la construcción.

Partiendo de lo anterior, es posible afirmar que se podría estar generando un sobrediseño en el pavimento rígido destinado a las calzadas de TransMilenio, y esto se ve reflejado en la cantidad de material, ya que se estaría utilizando más material del realmente requerido, con directas implicaciones económicas, ambientales y sociales. El problema parte del sobrediseño que se estaría presentando en algunas troncales, esto quiere decir que se está usando más material del realmente requerido, sin que se tenga datos sobre la mayor durabilidad de esos pavimentos, pero sí se reconoce su impacto económico.

A partir del presente trabajo, será posible revisar si en los pavimentos de TransMilenio realmente se impone la condición de no efecto berma considerada en el método PCA o las fallas se pueden atribuir a otros factores, si se están aplicando inadecuadamente los criterios de diseño o si, en efecto, en el ambiente bogotano la teoría desarrollada no es totalmente aplicable y se requiere diseñar siempre con la condición de no berma. Así mismo, si es posible plantear diferentes alternativas para controlar esfuerzos y deformaciones en las losas que también

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

contribuyan a controlar factores como la infiltración en los bordes, y sugerir nuevas opciones para el diseño de pavimento rígido, en las que se reduzca la inversión de manera innecesaria o, al menos, se racionalice.

Además, se espera que a largo plazo la posibilidad de proponer un punto de partida para continuar con la investigación enfocando su aplicación en calzadas mixtas en la ciudad de Bogotá o en municipios del país teniendo en cuenta factores que podrían alterar los resultados del presente proyecto como carga aportada por el tráfico, el tipo de tráfico o incluso la temperatura propia de cada municipio o zona de interés de estudio.

4. Marco teórico

4.1. Antecedentes

Los primeros pavimentos constituidos por losas de concreto tuvieron diversos usos hace más de un siglo en Europa; posteriormente fueron aplicados en una vía en Michigan, Estados Unidos donde el avance de estudios del comportamiento de estos materiales avanzó significativamente. Otros países que generaron grandes aportes a estudios y aplicación de este tipo de pavimento fueron Chile y Argentina en América del Sur y Alemania, Bélgica, Suiza e Inglaterra en Europa. (Arenas, 2006)

En la ciudad de Bogotá para finales de los 90, no se contaba con un sistema de transporte público ya que los presentes para esta época permanecían a cargo de empresarios privados, esto aumento la necesidad de compra y uso de autos particulares. Durante los periodos de administración comprendidos entre 1988 a 1997 se plantearon algunas propuestas para la creación de un sistema de transporte masivo; sin embargo, el proyecto se aprobó en octubre de 1999 y se constituye la Empresa de Transporte de Tercer Milenio, TRANSMILENIO SA. (TransMilenio SA, 2013)

En diciembre del año 2000 se inaugura la primera línea de TransMilenio por la Avenida Caracas y, durante este periodo, como primera fase, se entregan las troncales Autonorte, Caracas y Calle 80. Las dos primeras troncales se ejecutaron en pavimento rígido y la tercera, se utilizó un contrato ya en ejecución, en pavimento flexible, para implementar el proyecto hasta el Portal de la calle 80. La segunda fase conformada por las troncales Calle 13-Américas, NQS y Avenida Suba, se entregan en el periodo de administración comprendido entre 2001 y 2006. Finalmente, en la tercera fase, hacia el mes de octubre de 2010 entran en servicio todas las estaciones de las troncales Calle 26 y Carrera Decima además de iniciar la operación de los buses duales por la carrera séptima. Las troncales de TransMilenio han sido diseñadas en su gran mayoría con

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

pavimento rígido a excepción de la Calle 80, en la que se implementó el sistema sobre un pavimento diseñado para el Solobús, existente ya en la Avenida Caracas.

4.2. Estado del arte

Las troncales de Transmilenio que actualmente poseen pavimento rígido en Bogotá son: Autopista Norte, Av. NQS, Autopista Sur, Avenida de la Américas-Av Ciudad de Cali, Av. Suba y Av. Caracas, además de los patios portales. Actualmente se está ejecutando la reconstrucción y ampliación del tramo Avenida Caracas Sur, y empezando la Troncal Avenida 68 y la Troncal Avenida Ciudad de Cali hasta el límite con el municipio de Soacha.

En los términos actuales de referencia indicados por Transmilenio para el diseño de losas de concreto en estos tres últimos proyectos se establece que en los diseños no se considere el efecto de probables bermas que permitan una mejor distribución de esfuerzos en las losas de borde. Sin embargo, los pavimentos del sistema se encuentran, en general, confinados por bordillos o sardineles, y rodeados por espacio público. Por otra parte, en los términos contractuales del IDU se exige que todos los pavimentos de las vías y sus patios se diseñen sin considerar el efecto de berma.

De acuerdo con las consideraciones de los métodos de diseño AASHTO y PCA, se puede calcular un grado de efecto berma, que debería estar asociado con el uso real probable del pavimento, y a partir de la variación de los espesores de las losas y las bermas, o de controlar las zonas de losas que usa el tráfico, o generar protecciones adecuadas, se podría llegar a diferentes alternativas de solución económicas y beneficiosas para el sistema constructivo de las losas del pavimento rígido, para las calzadas exclusivas de Transmilenio, optimizando los recursos invertidos y logrando la funcionalidad que se espera de la estructura de pavimento.

Las técnicas de diseño de pavimentos rígidos, han sufrido, siguiendo el mismo camino que las de pavimentos flexibles, un largo recorrido desde el empirismo total de sus primeras épocas,

hasta el enfoque mezclado con visos mecanicistas de la actual Ingeniería de Pavimentos favorecido por el desarrollo de los computadores. En este último, por aproximaciones sucesivas, se trata de establecer esfuerzos y deformaciones, a partir de solución de ecuaciones en losas de geometrías y propiedades mecánicas preconcebidas, y con condiciones de frontera adoptadas.

Posteriormente, se busca garantizar su conformidad con criterios empíricos de aceptabilidad (principios de transferencia), de manera tal que, para repeticiones de cargas sucesivas previstas en un período de análisis se llegue al límite de comportamiento con cierto grado de aceptabilidad. La tendencia de la Ingeniería de pavimentos, a pesar de la persistencia de las tecnologías puramente empíricas, parece moverse en la línea de la mayor racionalidad normal en los desarrollos de la Ingeniería estructural. Esto es, determinar esfuerzos y deformaciones debidos a las cargas, en los miembros estructurales, y diseñar, a partir de aproximaciones sucesivas, dimensiones, materiales y refuerzos que les permitan soportarlas.

Las ecuaciones para evaluar esfuerzos y deformaciones se basan en principios arraigados en la Teoría de la Elasticidad cuyo desarrollo fundamental aplicado a los pavimentos rígidos se inicia con Westergaard (1926), con diversos aportes posteriores. Los principios de transferencia corresponden en gran medida al empirismo, basados en la determinación de ecuaciones que relacionen esfuerzos y deformaciones con número de aplicaciones de carga.

4.3. Marco conceptual

4.3.1. Pavimento rígido

La estructura clásica de pavimento rígido está constituida principalmente por una losa discontinua de concreto, que se puede apoyar directamente sobre la subrasante o sobre una capa de material seleccionado llamado subbase. Pueden, sin embargo, existir otras capas con propósitos particulares, entre las citadas o bajo ellas. En este tipo de pavimento los esfuerzos y deformaciones generados por las cargas del tránsito resultan mínimos gracias a la magnitud del área de aplicación. (Montejo, 2002)

4.3.2. Tipos de pavimento rígido:

En la industria de construcción de los pavimentos de concreto, se suelen proponer los siguientes tipos:

- Concreto simple, con juntas (JPCP): Es la condición en la que se construye el pavimento sin la presencia de acero de refuerzo y la transferencia de carga entre losas se da mediante la trabazón de los agregados o con el uso de elementos de transferencia. Se emplean juntas de contracción longitudinales y transversales para evitar las fisuras en la losa.
- Pavimentos reforzados, con juntas (JRCP): La transferencia de cargas se presenta mediante el uso de pasadores y una armadura de acero ubicada en el eje neutro como refuerzo del elemento y el uso de juntas de contracción con el fin de controlar la aparición de fisuras.
- Pavimentos de refuerzo continuo (CRCP): en este tipo de pavimento se considera normal la aparición de fisuras de hasta 0.5 mm de espesor, el acero de refuerzo se ubica hacia la parte superior o inferior de la losa y no se cuenta con juntas longitudinales ni transversales. El acero de refuerzo está conformado por vigas a los extremos y en sentido transversal y malla electro soldada o refuerzo de barras de acero.

4.3.3. Losa de concreto

Elemento estructural constituido por concreto simple o reforzado, que además de generar una superficie que facilite la circulación vehicular soporta las cargas que se aplican sobre las mismas y disminuyen la magnitud de los esfuerzos que llegan a la subrasante.

4.3.4. Subbase

Además de disminuir las deformaciones en la subrasante generando un apoyo uniforme de la losa de concreto, la subbase aporta un sistema de drenaje que no permite la acumulación de agua y asimismo disminuye el efecto de bombeo de los materiales finos de la subrasante a través de las juntas. (Montejo, 2002)

4.3.5. Subrasante

Es la capa más baja o inicial de la estructura de pavimento considerada como infinita, la calidad de esta influye en el espesor del pavimento. Para definir su calidad se evalúa la capacidad de soporte o la resistencia a la deformación de la misma, es importante considerar también su vulnerabilidad ante los cambios de humedad y volumen con respecto a su resistencia y efectos en las capas superiores de la estructura. (Montejo, 2002)

4.3.6. Berma

La berma es el espacio presente longitudinalmente en el límite de la calzada, en el caso del pavimento rígido, permite una mejor distribución de los esfuerzos generados por la carga del tránsito aplicada en los bordes externos de losa.

4.3.7. Efecto de berma

En la Universidad de Illinois se presentó un estudio que comprobó que los esfuerzos y deflexiones en las losas disminuyen con la aplicación de las cargas a una distancia de los bordes, evitando la aparición de grietas y daños en el pavimento en puntos críticos, a esta condición se le denomina efecto de berma. Shiraz Tayabji (1984) planteó los cálculos iniciales para determinar el grado de efecto de berma y algunos espesores que podrían controlar las deformaciones presentes en las losas. Con la intención de determinar en qué proporción es considerada la teoría del efecto de berma en las calzadas exclusivas de Transmilenio en Bogotá, se revisan algunas metodologías de diseño de pavimentos rígidos.

4.4. Esfuerzos y deformaciones en pavimentos rígidos

Para realizar un análisis completo de esfuerzos y deformaciones es necesario tener en cuenta los factores que generan esfuerzos en la losa, como lo son algunos cambios en temperatura, humedad o volumen de las capas que soportan la losa y la aplicación de cargas de tráfico. Debido a que la rigidez de la losa de concreto es mucho mayor con respecto a la de sus capas de apoyo, se

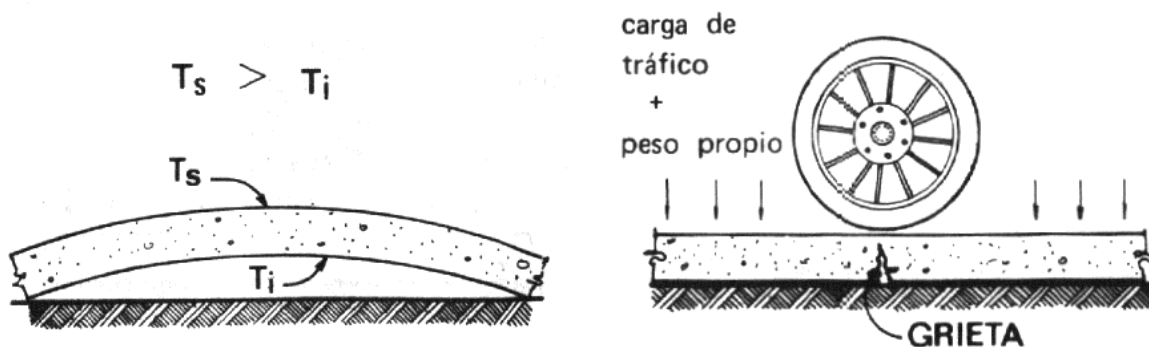
APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

considera que este elemento recibe la totalidad de esfuerzos aplicados y lo transmite a las capas inferiores de forma cercana a la homogénea.

4.4.1. Esfuerzos producidos por alabeo

Las estructuras de pavimento se encuentran continuamente expuestas a cambios de clima, que implican temperatura y humedad; en el caso del pavimento rígido, estos cambios generan deformaciones en las losas, conocidos como alabeo. Durante el día la temperatura de la cara inferior de la losa es baja y la de la cara superior es alta, lo que provoca una tendencia a curvarse de forma convexa lo que resulta en tracción en la fibra superior y compresión en la inferior; partiendo del mismo principio, la condición nocturna es opuesta, la losa tiende a deflectarse de manera cóncava lo que induce tracción en la cara inferior y compresión en la superior.

Imagen 1 Alabeo generado por cambios de la temperatura durante el día y efecto de la carga del tráfico.

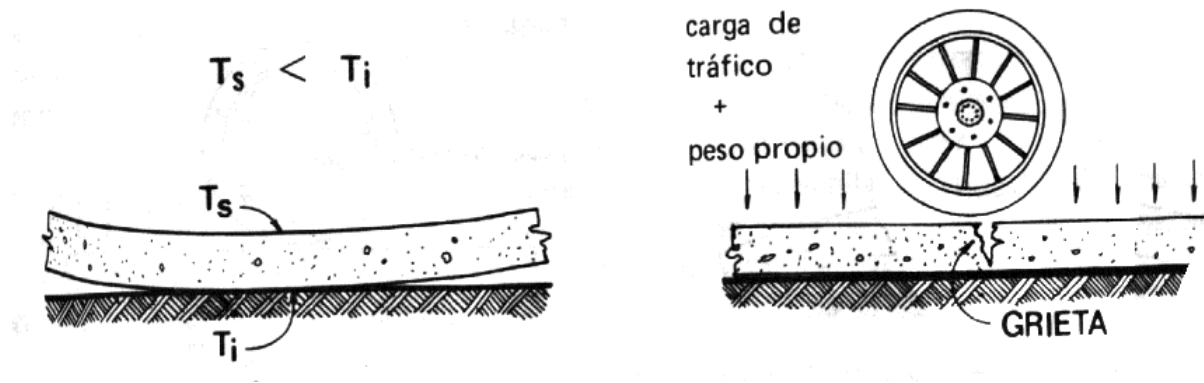


Fuente: Arenas (2006)

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

Nota. La figura muestra la diferencia de temperatura que se presenta en las losas y el efecto del paso de tráfico sobre las mismas en dicha situación, sumado al peso propio.

Imagen 2 Alabeo generado por cambios de la temperatura durante la noche y efecto de la carga del tráfico



Fuente: Arenas (2006)

Nota. La figura muestra la diferencia de temperatura que se presenta en las losas y el efecto del paso de tráfico sobre las mismas en dicha situación, sumado al peso propio.

4.4.2. Esfuerzos producidos por aplicación de cargas

Para realizar el cálculo de esfuerzos por aplicación de cargas debidas al tránsito, es posible aplicar los siguientes tres métodos: cálculo por fórmulas, cartas de influencia y modelos de elementos finitos. En los tres métodos mencionados se tiene en cuenta la condición de aplicación de las cargas, es decir, se considera que las cargas aplicadas en el centro de losa generan esfuerzos y deformaciones menores que los aplicados en los bordes o las esquinas de la misma.

4.4.3. Cálculo de esfuerzos por fórmulas

En 1926, Westergaard desarrolló el primer método de cálculo de esfuerzos debidos a cargas externas mediante fórmulas, partiendo de las siguientes hipótesis:

- La losa de concreto está en equilibrio, comportándose como un sólido elástico con propiedades homogéneas e isotrópicas.
- La reacción del suelo es vertical y proporcional a la deflexión de la losa.

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

- La reacción del suelo por unidad de área y en cualquier punto es igual al producto de la constante K (Módulo de Reacción de la subrasante) por la deflexión de la losa en dicho punto.
- El espesor de la losa es uniforme en cualquier punto.
- Cuando se estudia el caso de una carga en la esquina de la losa se considera una distribución circular y tangencial a los bordes de la losa que conforman la esquina. Cuando la carga se aplica en el borde, se toma como área de contacto un semicírculo cuyo diámetro coincide con el borde de la losa.

Este método permite el cálculo para una sola losa larga y se analizan las siguientes condiciones:

Cargas aplicadas en el interior de la losa

Westergaard (1926) desarrolla las fórmulas que permiten calcular el esfuerzo y la deformación en el interior de la losa bajo un área circular de radio a

$$\sigma_i = \frac{3(1 + \mu)P}{2\pi h^2} \left(\ln \frac{l}{b} + 0,6159 \right)$$

σ esfuerzo al interior de la losa (lb/pulg²)

μ relación de Poisson del concreto

P carga aplicada (lb)

h espesor de losa (pulg)

l radio de rigidez relativa (pulg)

$$b = a; \text{ cuando } a \geq 1,724h$$

$$b = \sqrt{1,6a^2 + h^2} - 0,675h \text{ cuando } a < 1,724 h$$

a radio del área circular de carga aplicada (pulg)

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

Definiendo la relación de Poisson igual a 0,15 y logaritmo en base 10, es posible escribir la ecuación para el cálculo de esfuerzo al interior de la losa, como:

$$\sigma_i = \frac{0,316P}{h^2} \left(4 \log \frac{l}{b} + 1,069 \right)$$

Y la deformación:

$$\Delta_i = \frac{P}{8kl^2} \left\{ 1 + \frac{1}{2\pi} \left[\ln \frac{(a)}{2l} + 0,673 \right] \left(\frac{a}{l} \right)^2 \right\}$$

Δ_i deflexión al interior de la losa (pulg)

a radio del área circular de carga aplicada (pulg)

k modulo de reacción de la subrasante (lb/pulg²)

l radio de rigidez relativa (pulg)

Cargas aplicadas en el borde de la losa

Westergaard (1926) desarrollo fórmulas para calcular el esfuerzo máximo y la deflexión debidos a cargas aplicadas en el borde de losa sobre un área circular o semicircular.

Esfuerzo máximo y deformación en un área circular:

$$\sigma_b = \frac{3(1+\mu)P}{\pi(3+\mu)h^2} \left[\ln \left(\frac{Eh^3}{100Ka^4} \right) + 1,84 - \frac{4\mu}{3} + \frac{1-\mu}{2} + \frac{1,18(1+2\mu)a}{l} \right]$$

$$\Delta_b = \frac{(2 + 1,2\mu P)^{1/2}}{(Eh^3K)^{1/2}} \left[1 - \frac{(0,76 + 0,4\mu)a}{l} \right]$$

$$\mu = 0,15$$

$$\sigma_b = \frac{0,803P}{h^2} \left[4 \log \left(\frac{l}{a} \right) + 0,666 \left(\frac{a}{l} \right) - 0,034 \right]$$

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

$$\Delta_b = \frac{0,431 P}{Kl^2} \left[1 - 0,82 \frac{a}{l} \right]$$

Esfuerzo máximo y deformación en un área semicircular:

$$\sigma_b = \frac{3(1+\mu)P}{\pi(3+\mu)h^2} \left[\ln \left(\frac{Eh^3}{100Ka^4} \right) + 3,84 - \frac{4\mu}{3} + \frac{(1+2\mu)a}{2l} \right]$$

$$\Delta_b = \frac{(2 + 1,2\mu P)^{1/2}}{(Eh^3K)^{1/2}} \left[1 - \frac{(0,323 + 0,17\mu)a}{l} \right]$$

$$\mu = 0,15$$

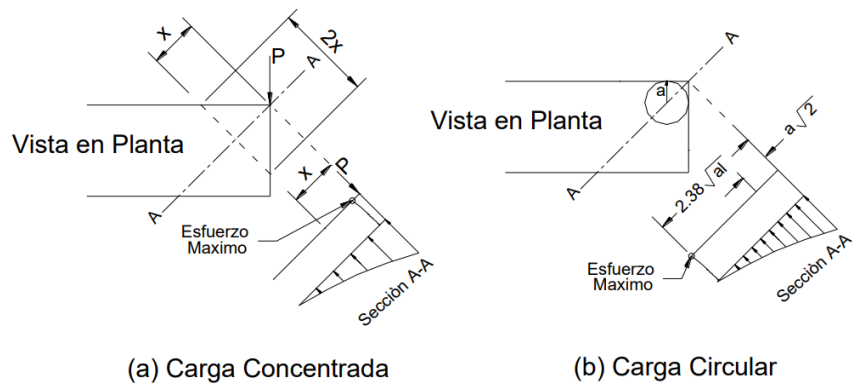
$$\sigma_b = \frac{0,803P}{h^2} \left[4 \log \left(\frac{l}{a} \right) + 0,282 \left(\frac{a}{l} \right) - 0,650 \right]$$

$$\Delta_b = \frac{0,431 P}{Kl^2} \left[1 - 0,349 \frac{a}{l} \right]$$

Cargas aplicadas en la esquina de la losa

Los esfuerzos generados muy cerca o directamente en la esquina de la losa pueden generar grietas y/o fallas; estos se presentan como se observa en la Figura 3.

Imagen 3 Esfuerzos por carga aplicada en la esquina de la losa



Fuente: Huang (2004)

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

Nota: La figura muestra los esfuerzos máximos en la losa generados por la aplicación de carga de forma puntual y circular.

Partiendo de un análisis por el método de aproximaciones sucesivas, Westergaard plantea las siguientes fórmulas para el cálculo de esfuerzos y deformaciones:

$$\sigma_e = \frac{3P}{h^2} \left[1 - \left(\frac{a\sqrt{2}}{l} \right)^{0,6} \right]$$

$$\Delta_e = \frac{P}{Klh^2} \left[1,1 - 0,88 \left(\frac{a\sqrt{2}}{l} \right) \right]$$

σ_e esfuerzo de tracción en cara superior de losa (lb/pulg²)

Δ_e deflexión en la esquina (pulg)

a radio del área de contacto (pulg)

k modulo de reacción de la subrasante (lb/pulg³)

l radio de rigidez relativa (pulg)

Posteriormente, Ioannides et al (1985) aplicaron el análisis por elementos finitos y sugirieron las siguientes formulas:

$$\sigma_e = \frac{3P}{h^2} \left[1 - \left(\frac{c}{l} \right)^{0,72} \right]$$

$$\Delta_e = \frac{P}{kl^2} \left[1,205 - 0,69 \left(\frac{c}{l} \right) \right]$$

c longitud de lado de área de contacto cuadrada

Encontrando que el momento máximo se genera a $1,80 c^{0,32} l^{0,59}$

Si la carga se aplica en un área circular, es necesario definir c partiendo de una similitud entre el área del cuadrado y del círculo.

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

$$c = 1,772 a$$

a radio de área de contacto (pulg)

Cálculo de esfuerzos por cartas de diseño

Las cartas de influencia fueron desarrolladas por Pickett & Ray (1951) con base en la teoría de Westergaard, considerando una relación de Poisson de 0,15 para concreto hidráulico, este método fue utilizado por la Asociación de Cemento Portland (PCA) en el proceso para el diseño de espesores de losa, permiten calcular la deflexión y los momentos generados por cualquier configuración de carga de tránsito, en losas de espesor uniforme.

Para obtener los resultados por dicho método, es necesario dibujar a escala las huellas de los neumáticos y determinar (N) el número de cuadrados que cubren y así aplicar las siguientes fórmulas:

Para determinar el momento:

$$M = \frac{pl^2}{10000}$$

Para determinar el esfuerzo:

$$\sigma = \frac{6M}{h^2}$$

Cálculo de esfuerzos por elementos finitos

El método de elementos finitos tiene como objetivo el análisis de un modelo complejo permitiendo un fraccionamiento en elementos más simples delimitados por nodos, cada nodo puede pertenecer a uno o más elementos. Ya que se trata de un procedimiento matemático, los resultados de este análisis pueden ser numéricos y exactos si se analizan los nodos y aproximados en otros elementos del modelo, por esta razón a mayor cantidad de elementos y nodos mayor exactitud se obtendrá en los resultados.

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

Debido a la complejidad de este método, se han desarrollado programas que permiten hacer numerosas iteraciones en menor tiempo y obtener resultados de mayor precisión.

2.5.3. Programa de análisis de esfuerzos Ever Fe

El software EverFe es una herramienta computacional desarrollada por la Universidad de Maine y la Universidad de Washington; facilita el análisis de modelos complejos tridimensionales de pavimento rígido aplicando el método de elementos finitos (FEM), permite determinar los esfuerzos y deflexiones generados en la superficie y la base de las losas mediante el ajuste de condiciones como gradientes de temperatura constantes y variables, uso de barras de transferencia y dovelas y configuraciones de hasta 9 losas y 3 capas de material de apoyo.

Tiene en cuenta variables de resistencia, geometría y localización de las capas de apoyo pertenecientes a la estructura de pavimento, losa de concreto y disposición de barras, asimismo permite analizar cualquier tipo de configuración de ejes y ruedas en la aplicación de carga de tránsito según sea requerido.

2.6. Tipos de daños en el pavimento rígido.

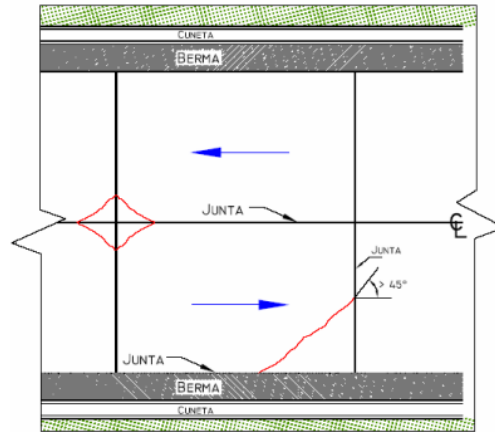
Debido a que las losas de concreto se encuentran expuestas a sufrir esfuerzos y deformaciones causados tanto por cambios de temperatura como por las cargas aplicadas, es necesario crear una estructura optima en la que la losa y su apoyo funcionen conjuntamente y disminuyan la dimensión de las deflexiones evitando así la aparición de daños como los que se mencionan a continuación.

2.6.1. Agrietamiento

- Grietas de esquina: Aparición de bloque de forma triangular en losas de concreto simple o reforzado; debida posiblemente a erosión de la base generando ausencia de apoyo, alabeo debido a cambios de temperatura, exceso de aplicación de cargas y deficiencia en la transferencia de cargas entre losas.

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

Imagen 4 Ilustración de grieta de esquina

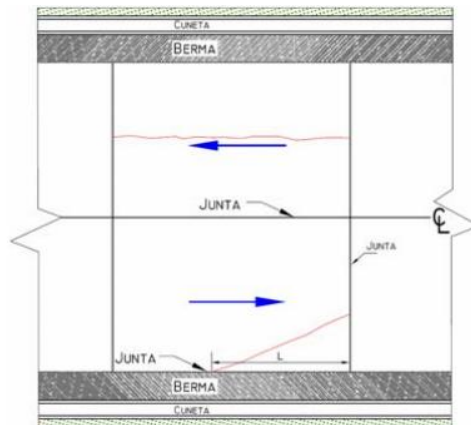


Fuente: Manual para la Inspección Visual de Pavimentos Rígidos. Invías (2006)

Nota: La imagen mostrada indica posibles casos de grietas de esquina.

- Grietas longitudinales: Grietas paralelas al eje de la calzada o ligeramente diagonal, este daño se puede presentar en cualquier tipo de pavimento rígido. Sus principales causas pueden ser: Asentamiento o erosión de la capa de apoyo, deformación por cambios de temperatura, gran magnitud de ancho de losa, entre otros motivos.

Imagen 5 Ilustración de grieta longitudinal



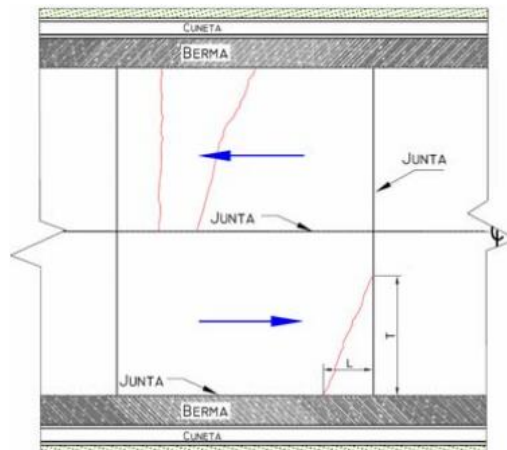
Fuente: Manual para la Inspección Visual de Pavimentos Rígidos. Invías (2006)

Nota: la imagen citada indica dos posibles ejemplos de grieta longitudinal.

- Grietas transversales: Se presentan de forma transversal al eje de la calzada

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

Imagen 6 Ilustración de grieta transversal

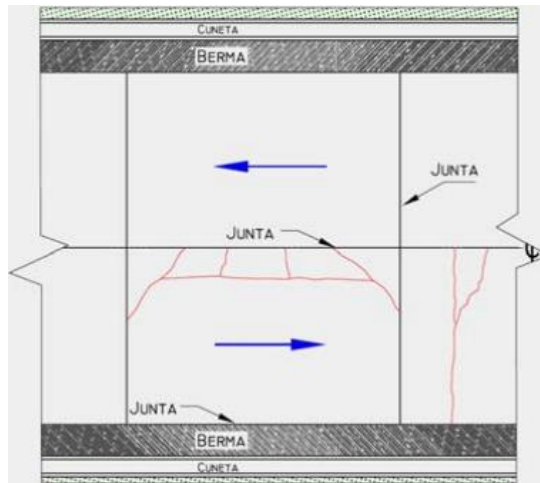


Fuente: Manual para la Inspección Visual de Pavimentos Rígidos. Invías (2006)

Nota: la imagen citada indica tres posibles ejemplos de grieta transversal.

- Grietas en bloque: Generadas por intersección entre grietas transversales y longitudinales, pueden aparecer más comúnmente en losas de concreto simple y reforzado. Causadas principalmente por fatiga o condiciones desfavorables de apoyo.

Imagen 7 Ilustración de grietas en bloque.



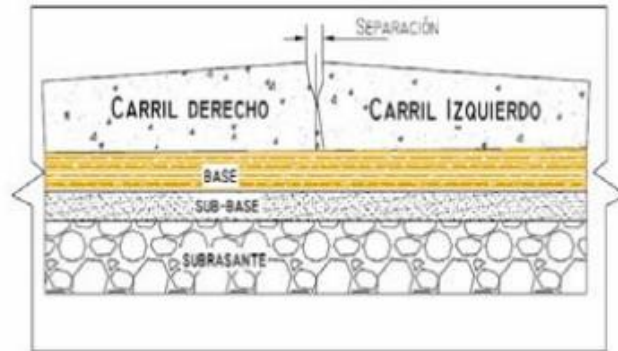
Fuente: Manual para la Inspección Visual de Pavimentos Rígidos. Invías (2006)

Nota: la imagen citada indica dos posibles ejemplos de grietas en bloque.

2.6.2. Daños en juntas

- Separación de juntas longitudinales: Esta abertura puede ser generada debido a desplazamiento de la losa por asentamiento diferencial en el apoyo de la misma o falta de berma.

Imagen 8 Ilustración de separación de juntas longitudinales.



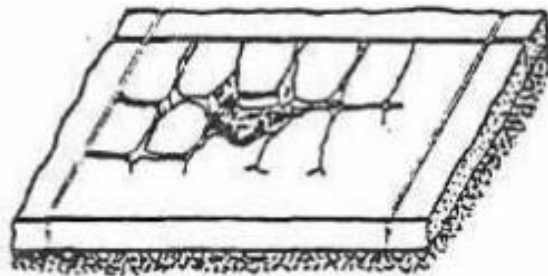
Fuente: Manual para la Inspección Visual de Pavimentos Rígidos. Invías (2006)

Nota: Se muestra la sección transversal de una separación de juntas longitudinales.

2.6.3. Deterioros superficiales

- Baches: Su severidad puede iniciar en la desintegración del material de la losa hasta dejar la capa de apoyo en exposición. Entre sus posibles causas se consideran: la inestabilidad de la fundación, espesores de losa insuficientes, almacenamiento de agua y tránsito sobre zonas afectadas.

Imagen 9 Ilustración de baches.



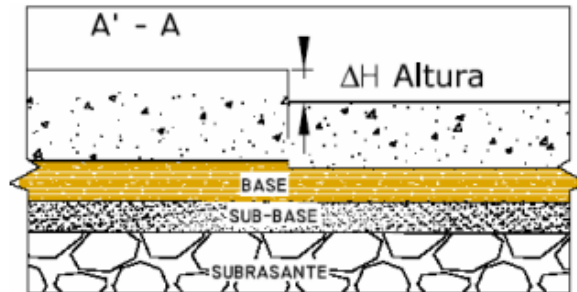
Fuente: Manual para la Inspección Visual de Pavimentos Rígidos. Invías (2006)

Nota: Se muestra una ilustración a modo de ejemplo de la pérdida de material convertida en bache.

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

- Escalonamiento de juntas: Este defecto implica un desnivel respecto a la losa adyacente, cuyas causas pueden incluir una deficiencia en la transferencia de cargas de una losa a otra y erosión, falta de soporte o asentamiento de la capa de apoyo.

Imagen 10 Ilustración de escalonamiento de juntas.



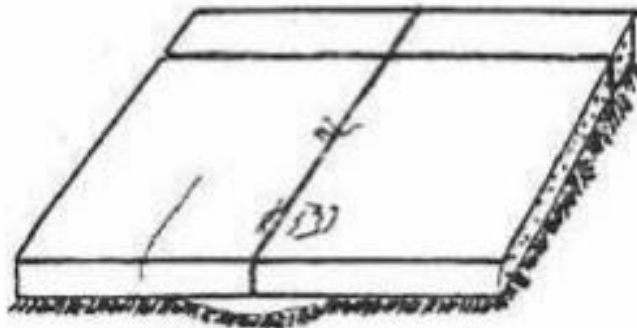
Fuente: Manual para la Inspección Visual de Pavimentos Rígidos. Invías (2006)

Nota: Se muestra la sección o corte de la estructura de pavimento con escalonamiento

2.6.4. Otros daños

- Bombeo sobre junta: Consiste en la expulsión de finos debido a la infiltración de agua bajo la losa y deflexión de la misma frente a la aplicación de cargas, generando una pérdida de material de la capa de apoyo afectando así su capacidad de soporte.

Imagen 11 Ilustración de bombeo.



Fuente: Manual para la Inspección Visual de Pavimentos Rígidos. Invías (2006)

Nota: Ilustración de una losa con acumulación de agua y efectos del bombeo.

2.7. Diseño de pavimentos rígidos

El diseño de pavimentos es un proceso encaminado al dimensionamiento de una superestructura que permita la circulación de vehículos de manera cómoda y segura, mediante la selección confiable de elementos como volumen de tránsito y condiciones climáticas, de suelo y materiales a utilizar.

Las primeras investigaciones para el diseño de pavimentos se dieron mediante en ensayo “AASHTO Road Test”, experimento a gran escala que buscó determinar los daños causados por el tráfico en diferentes tipos de pavimento. Más adelante, se crean mecanismos de análisis de respuesta estructural que combinados con la aplicación de modelos permiten predecir el comportamiento de los pavimentos. En el marco de esta investigación se construyó una pista dedicada a los pavimentos con losas de concreto, que se metió a cargas repetidas de camiones, en condiciones controladas de numero de pasadas, tipo de eje y registro del peso por eje. Con base en las observaciones de este experimento, se generó la metodología AASHTO, desde 1953, que fue ajustada en varias ocasiones, siendo la de 1993 y 1998 las dos últimas. En general, en Colombia cuando se hace uso de esta metodología, de base totalmente empírica, se usa la contenida en el manual de 1993. Cabe mencionar que las condiciones climáticas de la pista citada son bien diferentes de las existentes en Colombia, en relación con la existencia de marcadas estaciones, en el norte de los Estados Unidos.

2.7.1. Metodologías de diseño de pavimentos rígidos

2.7.1.1. Metodología PCA (1984)

Las primeras ideas que usa este método de la Portland Cement Association (PCA), fueron planteadas por Winkler (1867), en la teoría de elasticidad para el análisis de esfuerzo de una losa

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

rígida sobre un cuerpo líquido denso, adaptadas por Westergaard, (1927 a 1935) para el estudio de esfuerzos en diversos puntos de losas infinitas y posteriormente ajustada por diversos autores para losas finitas. A partir de cálculos con elementos finitos de Packard y Tayabji (1966) se refinan los cálculos y se plasman en un método mecanicista de fácil uso, adoptado por la Portland Cement Association (PCA, 1966) y luego reformado para espesores de diseño de losas usando el criterio de fatiga y erosión (Packard y Tayabji, 1984). En ese momento los cálculos se actualizan, convirtiéndose en los aplicados en la actualidad en Colombia, considerado un método empírico-mecanicista. Desarrollos posteriores (Darter et al, 2004) dan lugar a las técnicas postmodernas de diseño que vienen siendo implantadas en AASHTO, 2008 a 2012, aún sin usarse en Colombia, dado que requerirían labores de calibración y adaptación, tanto desde el punto de vista de las condiciones climáticas, de los materiales y técnicas constructivas y de las costumbres de uso.

Para llegar a la determinación del espesor de diseño y complementar el método, se plantearon modelos de elementos finitos con losas de diferentes dimensiones, con la intención de analizar el comportamiento del concreto hidráulico, en el modelo se modificaron las condiciones de las losas sometiénolas a aplicaciones de carga en puntos clave (centro, borde y esquinas), de esta manera es posible establecer un espesor mínimo que soporte la repetición de cargas a lo largo de todo el periodo de diseño. Para ello se utilizó el software JSLAB.

El objetivo principal de la metodología PCA es determinar el espesor apropiado para losas de concreto hidráulico, teniendo en cuenta las cargas de tráfico que soportarán.

Es importante considerar que si el espesor de diseño es mayor al necesario disminuyen los costos de mantenimiento; sin embargo, aumenta la inversión inicial generando un sobrediseño; por el contrario, si el espesor de diseño es menor al necesario, la inversión inicial será mucho más baja; sin embargo, los costos de mantenimiento y detención de tráfico serán muy altos, por lo que una ingeniería de calidad debe balancear costos iniciales y de mantenimiento. (PCA, 1984)

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

Este método de diseño tiene en cuenta el análisis de esfuerzos en el concreto y deflexiones en las juntas, bordes y esquinas, modelos a escala con cambio de condiciones de subbases, juntas y berma de concreto y análisis de pavimentos expuestos a tráficos controlados y reales. Además, se basa principalmente en dos criterios principales que son la fatiga y la erosión.

- **Fatiga:** La consideración de este criterio surge de la necesidad de controlar los daños generados por la repetición de cargas, moderando los esfuerzos aplicados para evitar la aparición de grietas.

Este método permite mantener un criterio ingenieril en el que se defina la consideración de subbases, presencia de berma y dovelas. Además, es necesario llegar a un valor acumulado menor pero próximo a 100% en el “consumo” de fatiga y el de erosión ya que un porcentaje mucho menor puede significar un sobrediseño.

- **Erosión:** Es un fenómeno resultante de varios factores; entre ellos está el grado de susceptibilidad de la cimentación del pavimento, la presencia de agua que puede suceder por fallas en los sistemas de drenaje y las cargas aplicadas y sus repeticiones, entre otros; y consiste en la expulsión de material desde la base del pavimento. Es necesario tener en cuenta este criterio con la finalidad de disminuir los impactos que tienen las deformaciones en los bordes, esquinas y juntas de losa.

Factores a tener en cuenta para diseño:

Para aplicar la metodología PCA es necesario determinar el tipo de pavimento rígido que se va a utilizar, el tipo de subbase y el tipo de soporte lateral; además de los siguientes factores previos al diseño:

- **Resistencia a la flexión del concreto (MR):** Se obtiene mediante pruebas de módulo de rotura en vigas, el diseñador considera el valor de resistencia promedio a los 28 días.
- **Módulo de reacción de subrasante y subbase (k combinado):** La obtención del valor de reacción de la subrasante se da mediante una prueba de carga sobre placa, sin embargo,

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

debido a los costos elevados de dicho ensayo se aplican correlaciones para determinarlo a partir del CBR y posteriormente determinar el k de la subbase mediante tablas.

- Tipo, carga y frecuencia del tráfico.
- Periodo de diseño.
- Factor de seguridad de tráfico.

El análisis consiste en, después de contar con las características citadas, proponer un espesor de losa con parámetros mecánicos definidos y modelar, con ayuda de software o de gráficas derivadas del programa JSLAB, el efecto que el paso de cada tipo de carga ejerce sobre una losa, tanto en el esfuerzo de flexión como en el trabajo ejercido en el borde libre de la losa. Comparando con el criterio de fatiga o el de erosión, se calcula el porcentaje de daño que cada paso de carga hace y se acumula.

El criterio de fatiga considera que los esfuerzos originados por las cargas del tránsito no exceden la resistencia a la flexión del concreto, si lo hicieran, provocarían la falla inmediata. Esto, de hecho, ha generado falla rápida en algunos casos en losas delgadas de pavimento o con resistencias muy escasas, en la ciudad o, con cargas muy pesadas de “dumpers” impropriamente utilizados en algunos casos, han provocado la falla precoz de varios pavimentos rígidos.

Lo normal, por lo contrario, es que una sola o pocas aplicaciones de carga no generan la falla de un pavimento adecuadamente diseñado, pero un proceso múltiple de cargas, introduciendo flexiones repetidas si va consumiendo su resistencia a la fatiga. Para tener en cuenta este criterio, en el diseño del pavimento se calculan los esfuerzos equivalentes de flexión producidos por el tránsito en cada rango de carga. Estos esfuerzos se comparan con el módulo de rotura, MR , del concreto a los 28 días, usando el cociente, que se denomina relación de flexión. Utilizando el número de pasadas de cada carga se compara contra el número admisible, lo cual arroja, en porcentaje el “consumo de fatiga”. De igual manera, se procede con todos los tipos de carga de eje y se totaliza para evaluar el “consumo total de fatiga”, el cual deber ser inferior al

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

100%. Este procedimiento usa la llamada: “Ley de Minor”, en honor a su gestor, quién consideró que si la carga provoca esfuerzos de flexión inferiores al 50% del módulo de rotura el consumo de fatiga es nulo y, por el contrario, cree en la medida en la que se tenga esfuerzos de flexión cada vez mayores, causados por cargas más pesadas.

En relación con el criterio de erosión, se trata de evaluar la relación de trabajo causado por la carga aplicada en el borde, supone que, a medida que esa relación incrementa, existe mayor riesgo de que la losa se mueva expulsando el agua que quede atrapada bajo la losa y arrastrando finos del material que proporciona el apoyo, lo cual causa escalonamiento o pérdida de soporte que implica falla del pavimento. En igual sentido que con el criterio anterior, se trata de usar algún criterio de falla y comparar contra él, de manera que se halle un consumo de erosión en porcentaje, para el acumulado de pasadas de cada tipo de eje y, acumulando todos los consumos, se debe llegar a un valor total de 100%. Este criterio tiene más discusiones técnicas debido a las imitaciones de los principios físicos que lo fundamentan y a la diferencia de erodabilidad que podrían tenerse con diferentes tipos de material de apoyo, Sin embargo, el desarrollo por PCA se sigue utilizando hasta la fecha en el país.

Los dos consumos máximos deben ser simultáneamente inferiores al 100%. Sin embargo, es normal que uno resulte más crítico que el otro, lo cual normalmente depende de la magnitud de las cargas que usaran el pavimento. Entre los dos criterios mencionados, en pavimentos de tráfico pesado como los del Sistema TransMilenio, es crítico es el de erosión, normalmente. En contraste, en pavimento de tráfico muy liviano, el criterio suele ser el de fatiga.

2.7.1.2. Metodología AASHTO (1993):

Es un método empírico desarrollado a partir de 2 años de pruebas a escala real, realizadas en el estado de Illinois, en el estudio AASHTO mencionado antes; el objetivo de estos ensayos era generar la relación entre las cargas de tránsito pesado y la pérdida de serviciabilidad del pavimento. La versión que se aplica en la actualidad tiene en cuenta diseño de sobrecapas y de

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

subbases delgadas, la erosión de la subbase y el confinamiento lateral, así como el análisis de ejes simples, tándem y trídem; durante los cálculos se incluye la serviciabilidad y el coeficiente de drenaje.

Algunas versiones a tener en cuenta son: la edición de 1998 que muestra un método de diseño alternativo y una guía Mecánica-Empírica del año 2002, publicada dos años después, en la que se incluyen factores de análisis que involucran clima, tráfico y materiales. A pesar de estas mejoras la edición de 1993 sigue siendo la más utilizada.

Entre las dos metodologías citadas, en el sistema Transmilenio existieron algunos intentos de uso de la metodología AASHTO cuando se diseñó el pavimento de la Avenida Caracas, pero, en ese momento, se optó por la metodología PCA, con la consideración de ser racional (basada en elementos físicos) y producir menores espesores de losa, para el tránsito pesado de Transmilenio, comportamiento normal de las metodologías citadas. En lo sucesivo, en todos los proyectos de Transmilenio se ha seguido usando el método PCA, e incluso está previsto en los términos de referencia de las entidades de esa manera, si bien se controlan cada vez con mayor énfasis los parámetros y, en particular, el efecto berma. Como se ha indicado, los términos de referencia de las últimas troncales exigen no considerar efecto berma en los diseños, pero ejecutarlos con la técnica PCA.

3. Metodología

- Revisión bibliográfica

Para iniciar el proyecto de investigación y consolidar el marco teórico, es necesario comprender el origen del estudio del efecto de berma en pavimentos rígidos, el comportamiento de esfuerzos y deformaciones de las losas de concreto hidráulico ante la aplicación de cargas y el uso de estos principios en los métodos de diseño (PCA y AASHTO) que se tienen en cuenta en la actualidad. Asimismo, es necesario conocer los términos contractuales de TransMilenio SA y los términos de diseño utilizados en las troncales con pavimentos rígido del sistema.

- Recolección de datos

Se realiza una visita de campo cuyo propósito será la determinación del porcentaje de efecto de berma que se presenta en las troncales del sistema de TransMilenio, observando la continuidad con la que los articulados circulan por el borde de losa. Durante esta actividad también es posible el reconocimiento del estado de la estructura de pavimento en cuanto a fallas por erosión y/o fatiga.

Además, se toma como base los parámetros empleados en el diseño de las estructuras de pavimento generado para el patio taller de TransMilenio ubicado en el municipio de Soacha, tomado como ejemplo para análisis de sensibilidad de los parámetros de diseño.

- Diseño de estructuras

Por medio del software Bs-PCAA destinado al “Diseño de pavimentos rígidos por el método de la PCA y AASHTO” se pretende obtener los espesores óptimos de las losas de concreto hidráulico para cada uno de los casos que serán estudiados posteriormente mediante el programa de análisis de modelos por elementos finitos.

- Modelo de elementos finitos

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

Se generan varios modelos de elementos finitos con la intención de conocer el comportamiento de esfuerzos y deformaciones en la losa, considerando algunas variables como el espesor de diseño, las cargas aplicadas a la losa y las condiciones del suelo de apoyo, con el fin de proponer posibles soluciones que sean beneficiosas constructiva y económicamente.

El proyecto se divide en 5 puntos principales de estudio:

1. Revisión bibliográfica con la intención de comprender las metodologías que consideran el efecto berma y su origen.
2. Observación en campo del recorrido de las llantas de los articulados en las losas y del estado de las losas en troncales que usan pavimento rígido, tomando como ejemplo sitios de muestreo de la Autopista Norte, Av. Caracas, Av. Américas, Autopista sur.
3. Determinar la forma en que se controlan los temas de bermas y esfuerzos diferentes métodos de diseño de pavimento rígido como lo son AASHTO, PCA, entre otros.
4. Realizar un análisis de esfuerzos con diferentes metodologías como un modelo de elementos finitos.
5. Finalmente, a partir de ver cómo han sido las revisiones en Bogotá, si se tiene o no en cuenta el efecto berma, limitaciones, comportamiento de esfuerzos, etc., se busca generar recomendaciones en respuesta a si se debe o no diseñar considerando el efecto berma.

3.1. Análisis porcentaje de tráfico sobre borde de losa (investigación de campo)

Los diseños generados para las troncales más recientes se han llevado a cabo considerando que más del 90% de las cargas se aplican directamente sobre el borde de losa, bajo esta idea se busca disminuir los esfuerzos y asimismo las deformaciones para evitar la aparición temprana de daños en las losas.

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

Partiendo de lo mencionado anteriormente y con el fin de determinar el porcentaje de cargas que son aplicadas directamente sobre el borde de la losa, se realizan varias salidas de campo en las que se observó el recorrido de los articulados para determinar las situaciones con mayor recurrencia en cada una de las troncales, los videos tomados en cada Troncal se encuentran en los anexos del proyecto.

Fue posible evidenciar que, la mayoría de los articulados circulan guardando una distancia importante del bordillo o separador de tráfico (según en caso) como se muestra en las siguientes imágenes:

Imagen 12 *Troncal Avenida El Dorado*



Fuente: Propia

Nota: La fotografía indica una ubicación aproximada de la aplicación de cargas del articulado sobre las losas.

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

Imagen 13 *Troncal Avenida El Dorado*



Fuente: Propia

Nota: La fotografía indica una ubicación aproximada de la aplicación de cargas del articulado sobre las losas.

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

Imagen 14 Troncal Avenida El Dorado



Fuente: Propia

Nota: La fotografía indica una ubicación aproximada de la aplicación de cargas del articulado sobre las losas.

Imagen 15 Troncal Avenida Suba



Fuente: Propia

Nota: La fotografía indica una ubicación aproximada de la aplicación de cargas del articulado sobre las losas.

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

Por otro lado, se encontró que una de las situaciones que más se repetía en las zonas con presencia de doble carril, era la circulación de articulados por el centro de la calzada y no por uno de los dos carriles, lo que significa que las cargas son aplicadas a gran distancia de las zonas críticas de la losa disminuyendo así los esfuerzos en las losas.

Imagen 16 *Troncal Autopista Norte*



Fuente: Propia

Nota: La fotografía indica una ubicación aproximada de la aplicación de cargas del articulado sobre las losas.

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

Imagen 17 *Troncal Avenida Américas*



Fuente: Propia

Nota: La fotografía indica una ubicación aproximada de la aplicación de cargas del articulado sobre las losas.

Finalmente, para la determinación cuantitativa del porcentaje de cargas aplicadas sobre el borde de la losa, se define una distancia de 30 centímetros (1 pie) como referencia y se toma la distancia a la que pasa cada articulado durante 1 hora. De esta manera se pudo determinar que ningún articulado circulo a menos de 25 cm del borde de losa y solo el 17% se acercó al borde entre los 25 y 50 cm.

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

Imagen 18 *Recolección de datos en campo Troncal Caracas*



Fuente: Propia

Nota: Referencia tomada para recolección de datos en campo.

Tabla 1 *Resultados trabajo de campo. Porcentaje de Camiones al Borde.*

Porcentaje de articulados que circulan por el borde de losa.		
Total	127	100%
25-50	22	17%
<25 cm	0	0%

Fuente: Elaboración propia

Nota: Cálculo de porcentajes de Camiones que circulan a menos de 50 y 20 cm del borde de la losa.

Las observaciones del trabajo de campo de esta investigación confirman lo afirmado por Tayabji en 2005, en visita de asesoría técnica al IDU, según la afirmación del director de este trabajo de grado (comunicación personal Gutiérrez C.I., 2022).

Los valores obtenidos durante el proceso son aplicados posteriormente durante el dimensionamiento de las estructuras a analizar, puesto que el software BS-PCAA tiene en cuenta el “% de Camiones al Borde” y la consideración de berma o no berma.

3.2. Diseño de estructuras de pavimento

Con el propósito de llevar a cabo un estudio en condiciones similares a la realidad, se recurre al informe de diseño de pavimentos del proyecto del patio-portal y taller de TransMilenio “El Vínculo”, ubicado en el municipio de Soacha, actualmente en etapa de construcción, en el proyecto Transmilenio Soacha, del cual se obtiene información acerca de la caracterización del suelo, la disposición de la estructura de pavimento utilizada, el tránsito calculado tanto en la vía de acceso (Acceso Sur) como dentro el patio y las condiciones que se tuvieron en cuenta al momento de diseñar.

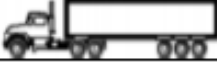
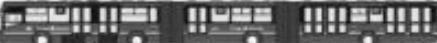
Partiendo de esta información, se genera el dimensionamiento de las estructuras de pavimento rígido por medio del software de diseño BS-PCAA teniendo en cuenta la variación de algunos parámetros de diseño.

Tránsito

Los tramos a analizar corresponden a zonas de tránsito exclusivo de buses articulados y biarticulados; sin embargo, las cargas aplicadas varían teniendo en cuenta que en la zona de la autopista y en la plataforma de pasajeros, los buses se encontrarán cargados, mientras que en el interior del patio-taller los buses circulan vacíos como se muestra a continuación:

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

Tabla 2 Distribución de cargas por eje en buses articulados y biarticulados.

TIPO DE VEHICULO			CARGA Y TIPOLOGÍA POR EJE (Ton)			
			EJE 1	EJE 2	EJE 3	EJE 4
BUSETA 			4.0 SINGLE	6.5 SINGLE		
BUS 			5.0 SINGLE	8.0 SINGLE		
C2P 			6.0 SINGLE	11.0 SINGLE		
C2G 			4.0 SINGLE	8.5 SINGLE		
C3 			6.0 SINGLE	20.5 TANDEM		
C4 			6.0 SINGLE	8.0 SINGLE	23.0 TANDEM	
C5 			6.0 SINGLE	20.0 TANDEM	24.0 TANDEM	
>C5 			6.0 SINGLE	18.0 TANDEM	28.5 TRIDEM	
ARTICULADO	CARGADO DISEÑO		7.5 SINGLE	12.5 SINGLE	12.5 SINGLE	
	CARGADO DIESEL		5.56 SINGLE	6.82 SINGLE	5.31 SINGLE	
	CARGADO GAS		5.45 SINGLE	3.50 SINGLE	9.05 SINGLE	
	vacío		5.56 SINGLE	6.82 SINGLE	9.05 SINGLE	
BIARTICULADO	CARGADO DISEÑO		7.5 SINGLE	12.5 SINGLE	12.5 SINGLE	12.5 SINGLE
	CARGADO DIESEL		5.29 SINGLE	7.34 SINGLE	5.62 SINGLE	5.68 SINGLE
	CARGADO GAS		5.75 SINGLE	7.30 SINGLE	6.15 SINGLE	6.30 SINGLE
	vacío		5.75 SINGLE	7.34 SINGLE	6.15 SINGLE	6.30 SINGLE

Fuente: Informe de estudio de suelos y diseño de pavimentos. Concreto (2020).

Nota: Cargas consideradas en el diseño del proyecto del Patio-Taller “El Vínculo”

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

Tabla 3 Tránsito Autopista calzada exclusiva.

EJES SINGLE	
EJE (ton)	REPETICIONES
4.00	-
5.00	-
5.56	-
5.75	-
6.00	-
6.15	-
6.30	-
6.50	-
6.82	-
7.34	-
7.50	13,680,102
8.00	-
8.50	-
9.05	-
11.00	-
12.50	34,880,550

Fuente: Anexos Informe de estudio de suelos y diseño de pavimentos. Concreto (2020).

Nota: Repetición calculada para las cargas de ejes principales en el Tramo de la Autopista Sur.

Tabla 4 Tránsito en el interior del Patio-Taller

EJES SINGLE	
EJE (ton)	REPETICIONES
4.00	-
5.00	-
5.56	2,759,400
5.75	2,969,640
6.00	-
6.15	2,969,640
6.30	2,969,640
6.50	-
6.82	2,759,400
7.34	2,969,640
7.50	286,452
8.00	-
8.50	-
9.05	2,759,400
11.00	-
12.50	721,386

Fuente: Anexos Informe de estudio de suelos y diseño de pavimentos. Concreto (2020).

Nota: Repetición calculada para las cargas de ejes principales en el Tramo al interior del Patio-Taller

Cálculo k combinado

Durante el diseño de las estructuras de pavimento presentadas en el informe se considera el uso de un mejoramiento mediante una capa de rajón o varias de material de terraplén, puesto que el suelo de la subrasante se considera altamente expansivo, motivo por el cual se propone una alternativa para controlar los cambios de humedad en la subrasante y compensar las probables presiones de expansión. En el presente proyecto se tendrá en cuenta una variación del valor de k combinado teniendo en cuenta el mejoramiento en rajón. El rango de variación se define entre 100 y 160 Mpa.

Análisis de sensibilidad

El software BS-PCAA realiza la estimación del espesor óptimo de la losa mediante un análisis de sensibilidad que utiliza las ecuaciones y monogramas de la Metodología PCA 1984, para la ejecución de dicho análisis se requiere la definición de los rangos de variación y el paso entre cada cálculo de los siguientes parámetros:

- Resistencia K del apoyo
- Espesor de la losa
- Módulo de Rotura de la losa
- Factor de Mayoración de Repeticiones
- Berma y Pasadores

El tramo externo, de la Autopista Sur se diseña con un Factor de Seguridad de carga de 1.2 ya que, como se mencionó anteriormente, los buses generalmente circulan cargados, y corresponden a cargas especiales. Adicionalmente el Factor de seguridad de carga citado es exigido en los sistemas de Transmilenio. Resulta interesante que el diseñador supuso que hasta el 17% de las cargas podrían ser aplicadas cerca del borde de losa. En cuanto al tramo seleccionado al interior del Patio-Taller se aplicó un FS de 1.1 puesto que las cargas aplicadas son únicamente

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

las de los articulados vacíos y por la modulación de la zona ninguna carga circula por el borde de losa.

Tabla 5 *Parámetros de diseño – Tramo Autopista*

Tramo Autopista		
FS	1.2	
Radio de carga	25.5	cm
Ancho eje	210	cm
Separación de llantas	4.5	cm
K	Variable	Mpa/m
Espesor	Variable	cm
Longitud	4	m
Ancho	3	m
MR	4.5	Mpa
Berma	SI/NO	
Ancho Berma	30	cm
% camiones al borde	0	%

Fuente: Elaboración propia

Nota: Parámetros de diseño seleccionados para software BS-PCAA

Tabla 6 *Parámetros de diseño – Tramo Autopista*

Tramo Patio-Taller		
FS	1.1	
Radio de carga	25.5	cm
Ancho de eje	120	cm
Separación de llantas	4.5	cm
K	Variable	Mpa/m
Espesor	Variable	cm
Longitud	4	m
Ancho	3	m
MR	4.5	Mpa
Berma	SI/NO	
Ancho Berma	30	cm
% camiones al borde	17	%

Fuente: Elaboración propia

Nota: Parámetros de diseño seleccionados para software BS-PCAA

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

Resultados del diseño mediante software BS-PCA

Imagen 19 Diseño BS-PCAA de tramo Autopista con berma.

Opciones Fórmulas Espectro Sensibilidad Terminar

Descripción: Bs-PCAA Tramo Autiposta

TRÁNSITO **Parámetros de Diseño PCA** **Parámetros de Diseño AASHTO**

Resistencia K del Apoyo: 160 Mpa/m K Combinado

Esesor Losa [h1]: 24 cm

Longitud Losa [L]: 4 m

Ancho Losa [W]: 3 m

Módulo de Elasticidad [E1]: 28000 Mpa

Densidad [s1]: 2.4 Tn/m3

Relación de Poisson [u1]: 0.15

Módulo de Rotura [Sc]: 4.5 Mpa

Capas: Una Capa

Coefficiente de Variación [CV] (%): 15

Ancho de Berma [D0]: 30 cm

Factor de Trabazón de Agregados [AGG]: 0 Mpa

☒ Con Pasadores

% Camiones al Borde: 17

Datos Ambientales

Diferencial Temperaturas [dT]: 10 oF

Coefficiente Térmico [alfa]: 5.500E-06 1/oF

% Tránsito para Alabeo: 0

Consumo Erosión (%): 45.6858

Consumo Esfuerzo (%): 0

Espectro de Cargas

Guardar Abrir

Imprimir

Salir

Fuente: Software BS-PCAA

Nota: Diseño considerando berma en Tramo de Autopista Sur

Imagen 20 Diseño BS-PCAA de tramo Autopista sin berma.

Opciones Fórmulas Espectro Sensibilidad Terminar

Descripción: Bs-PCAA Tramo Autiposta

TRÁNSITO **Parámetros de Diseño PCA** **Parámetros de Diseño AASHTO**

Resistencia K del Apoyo: 160 Mpa/m K Combinado

Esesor Losa [h1]: 30 cm

Longitud Losa [L]: 4 m

Ancho Losa [W]: 3 m

Módulo de Elasticidad [E1]: 28000 Mpa

Densidad [s1]: 2.4 Tn/m3

Relación de Poisson [u1]: 0.15

Módulo de Rotura [Sc]: 4.5 Mpa

Capas: Una Capa

Coefficiente de Variación [CV] (%): 15

Ancho de Berma [D0]: 0 cm

Factor de Trabazón de Agregados [AGG]: 0 Mpa

☒ Con Pasadores

% Camiones al Borde: 17

Datos Ambientales

Diferencial Temperaturas [dT]: 10 oF

Coefficiente Térmico [alfa]: 5.500E-06 1/oF

% Tránsito para Alabeo: 0

Consumo Erosión (%): 80.0262

Consumo Esfuerzo (%): 0

Espectro de Cargas

Guardar Abrir

Imprimir

Salir

Fuente: Software BS-PCAA

Nota: Diseño Sin consideración de berma en Tramo de Autopista Sur

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

Imagen 21 Diseño BS-PCAA de tramo Patio-Taller con berma.

Opciones Fórmulas Espectro Sensibilidad Terminar

Descripción: Bs-PCAA Tramo Patio Taller

TRÁNSITO **Parámetros de Diseño PCA** **Parámetros de Diseño AASHTO**

Resistencia K del Apoyo: 160 Mpa/m K Combinado

Espeor Losa [h1]: 19 cm

Longitud Losa [L]: 4 m

Ancho Losa [W]: 3 m

Módulo de Elasticidad [E1]: 28000 Mpa

Densidad [s1]: 2.4 Tn/m3

Relación de Poisson [u1]: 0.15

Módulo de Rotura [Sc]: 4.5 Mpa

Coefficiente de Variación [CV] (%): 15

Ancho de Berma [D0]: 30 cm

Factor de Trabazón de Agregados [AGG]: 0 Mpa

☒ Con Pasadores

% Camiones al Borde: 0

Capas: Una Capa

Datos Ambientales

Diferencial Temperaturas [dT]: 10 oF

Coefficiente Térmico [alfa]: 5.500E-06 1/oF

% Tránsito para Alabeo: 0

Consumo Erosión (%): 36.6758

Consumo Esfuerzo (%): 2.5629

Espectro de Cargas

Guardar Abrir

Imprimir

Salir

Fuente: Software BS-PCAA

Nota: Diseño considerando berma en Tramo de Patio-Taller.

Imagen 22 Diseño BS-PCAA de tramo Patio-Taller sin berma.

Opciones Fórmulas Espectro Sensibilidad Terminar

Descripción: Bs-PCAA Tramo Patio Taller

TRÁNSITO **Parámetros de Diseño PCA** **Parámetros de Diseño AASHTO**

Resistencia K del Apoyo: 160 Mpa/m K Combinado

Espeor Losa [h1]: 21 cm

Longitud Losa [L]: 4 m

Ancho Losa [W]: 3 m

Módulo de Elasticidad [E1]: 28000 Mpa

Densidad [s1]: 2.4 Tn/m3

Relación de Poisson [u1]: 0.15

Módulo de Rotura [Sc]: 4.5 Mpa

Coefficiente de Variación [CV] (%): 15

Ancho de Berma [D0]: 0 cm

Factor de Trabazón de Agregados [AGG]: 0 Mpa

☒ Con Pasadores

% Camiones al Borde: 0

Capas: Una Capa

Datos Ambientales

Diferencial Temperaturas [dT]: 10 oF

Coefficiente Térmico [alfa]: 5.500E-06 1/oF

% Tránsito para Alabeo: 0

Consumo Erosión (%): 63.9692

Consumo Esfuerzo (%): 21.1715

Espectro de Cargas

Guardar Abrir

Imprimir

Salir

Fuente: Software BS-PCAA

Nota: Diseño Sin consideración de berma en Tramo de Patio-Taller.

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

Tabla 7 Resultados dimensionamiento BS-PCAA

TRAMO	Con berma	Sin berma
Autopista	24 cm	30 cm
Patio-Taller	19 cm	21 cm

Fuente: Elaboración propia

3.3. Análisis estructural por medio de elementos finitos

Las técnicas de diseño de la PCA han sido desarrolladas con base en gráficas y formulaciones de correlación, generadas a partir 4 resultados de múltiples aplicaciones de técnicas de elementos finitos, con el programa JSLAB, usado por Tayabji. En últimas, el proceso consiste en calcular esfuerzos y deformaciones debidos a la aplicación de cargas de diversas magnitudes y geometrías, en losas con diferentes geometrías y propiedades mecánicas de los materiales, cimentadas sobre materiales de diferentes características mecánicas modeladas como sistemas de Winkler, que se representan por módulos de reacción k . Para el análisis con la técnica de elementos finitos (FEM), en este trabajo se utilizó el programa EverFE.

EverFE es una herramienta de análisis específica para pavimentos rígidos, que utiliza la tecnología de elementos finitos (FEM); el programa fue desarrollado en la Universidad de Washington en el año de 1998 y permite realizar un análisis de esfuerzos y deformaciones en las tres dimensiones de la losa de concreto hidráulico y las capas de cimentación tanto en el sistema inglés de unidades como en el sistema internacional de medidas.

Este programa permite al usuario introducir los datos de forma fácil y rápida pues utiliza un entorno gráfico donde se visualizan los datos de entrada para el análisis. Cuando éste ha terminado, el programa muestra los resultados de esfuerzos y deformaciones de forma gráfica y numérica en cualquier punto de la estructura de pavimento deseado por el usuario.

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

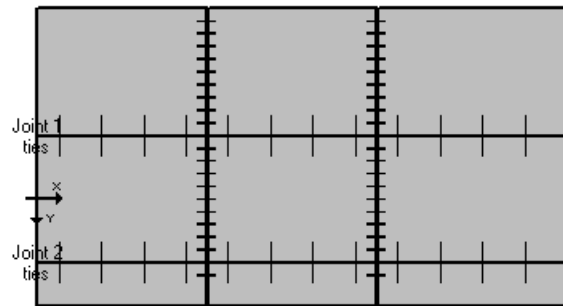
En el programa, los esfuerzos positivos significan que el elemento se encuentra sometido a tracción, mientras que si el esfuerzo es negativo, significa que el elemento se encuentra sometido a compresión.

Geometría

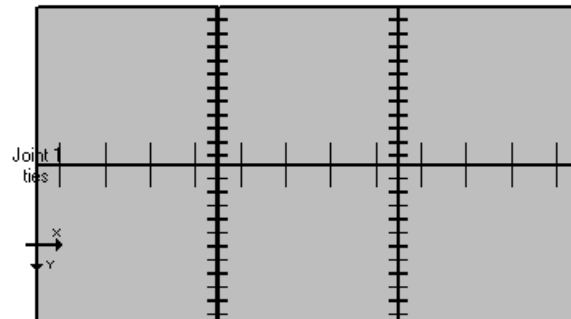
Para la disposición de las losas se tuvo en cuenta 3 casos de estudio: el tramo seleccionado sobre la Autopista Sur que consta de dos carriles, uno en cada sentido y dos losas cada una de 3.5 de ancho y 4 m de largo (a) con y (b) sin berma, y el tramo seleccionado dentro del Patio-Taller (c), el cual por su geometría no cuenta con carriles demarcados por lo que se simula con una distribución de 9 losas, máximo tamaño de modelo que permite el programa.

Imagen 23 Geometría seleccionada para cada tramo de estudio

(a) Geometría de losas Tramo Autopista, con berma

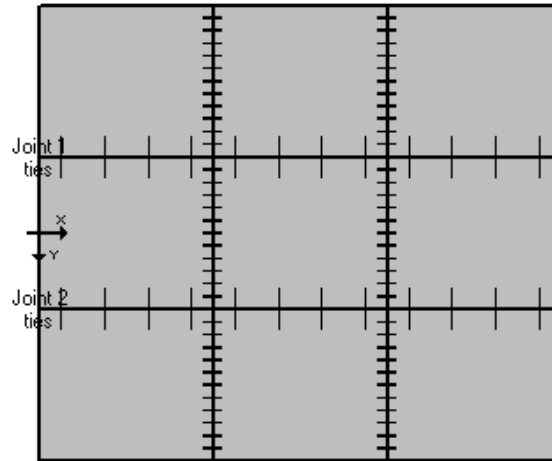


(b) Geometría de losas Tramo Autopista, sin berma



APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

(c) Geometría de losas Tramo Patio taller, con berma



Fuente: EverFe 2.24.

Nota: Distribución de las losas según el tramo de estudio

Material

Se mantienen constantes los parámetros referentes al concreto hidráulico y se varían las condiciones del módulo de reacción de la capa de apoyo de la losa entre 0.90 Mpa/mm y 0.16 Mpa/mm con el fin de conocer el efecto que esta capa tiene en los esfuerzos de la losa.

Tabla 8 Parámetros de concreto hidráulico aplicados en los modelos.

Módulo de elasticidad (Mpa)	28000
Coefficiente de Poisson	0.15
Coefficiente térmico (por °C)	1.1×10^{-5}
Densidad (Kg/m ³)	2400

Fuente: Elaboración propia

Cargas

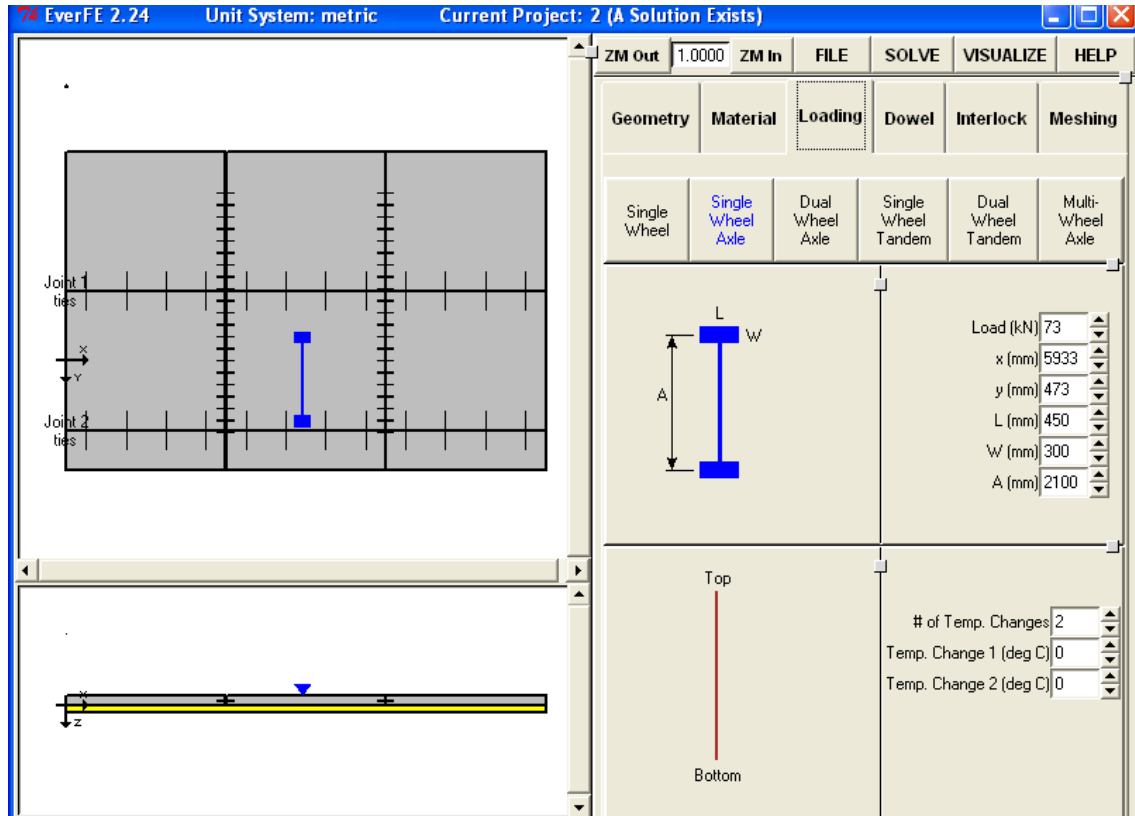
Los modelos se realizaron teniendo en cuenta las cargas de diseño de los ejes de los buses de TransMilenio, los cuales son, en condición de carga nominal máxima:

- un eje sencillo direccional de 7.5 ton
- 2 o 3 ejes simples de rueda doble de 12.5 ton. (buses articulados y biarticulados)

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

Con el propósito de conocer el comportamiento de los esfuerzos y las deformaciones en las zonas críticas de las losas, se ubicaron las cargas en esquina, borde y centro en cada uno de los tres casos de geometría ya mencionados.

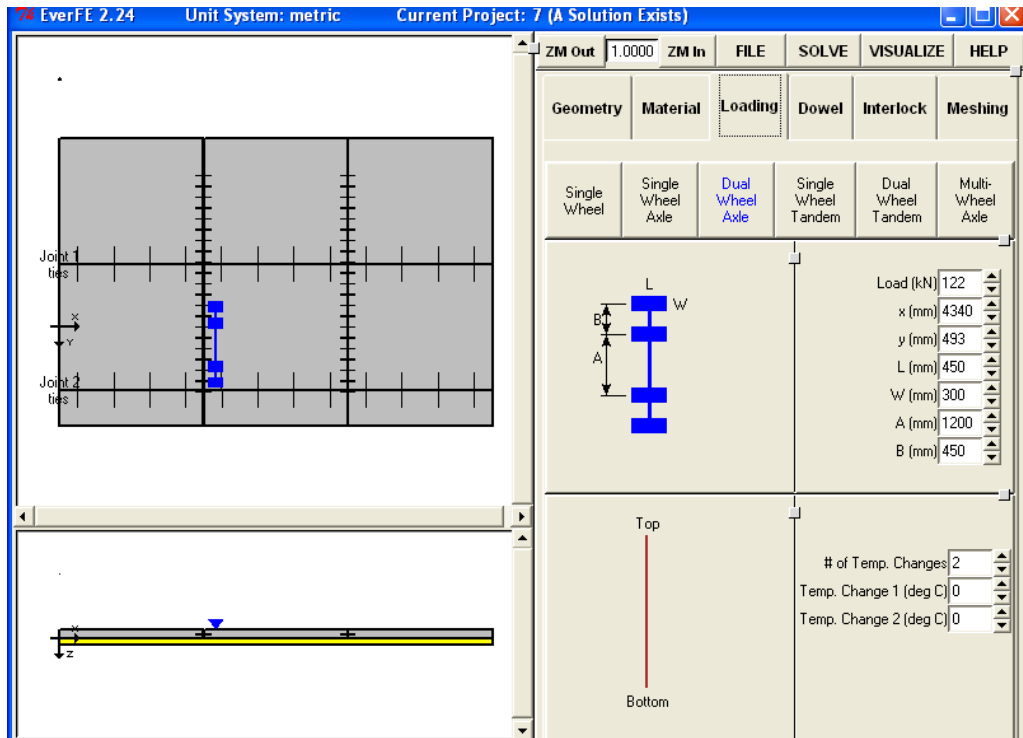
Imagen 24 Dimensiones de eje delantero direccional.



Fuente: Software EverFe 2.24.

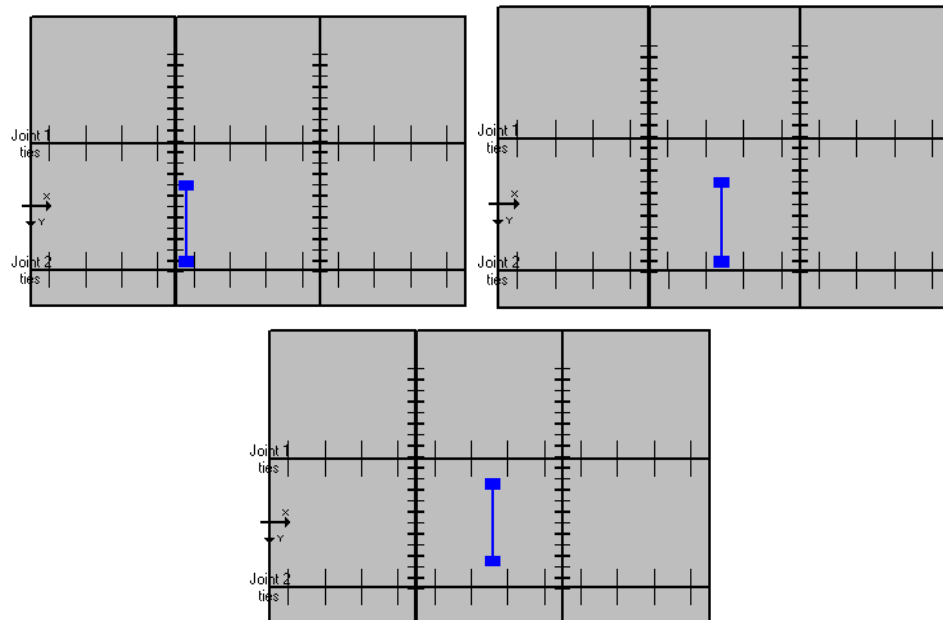
APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

Imagen 25 Dimensiones de eje delantero direccional.



Fuente: Software EverFe 2.24.

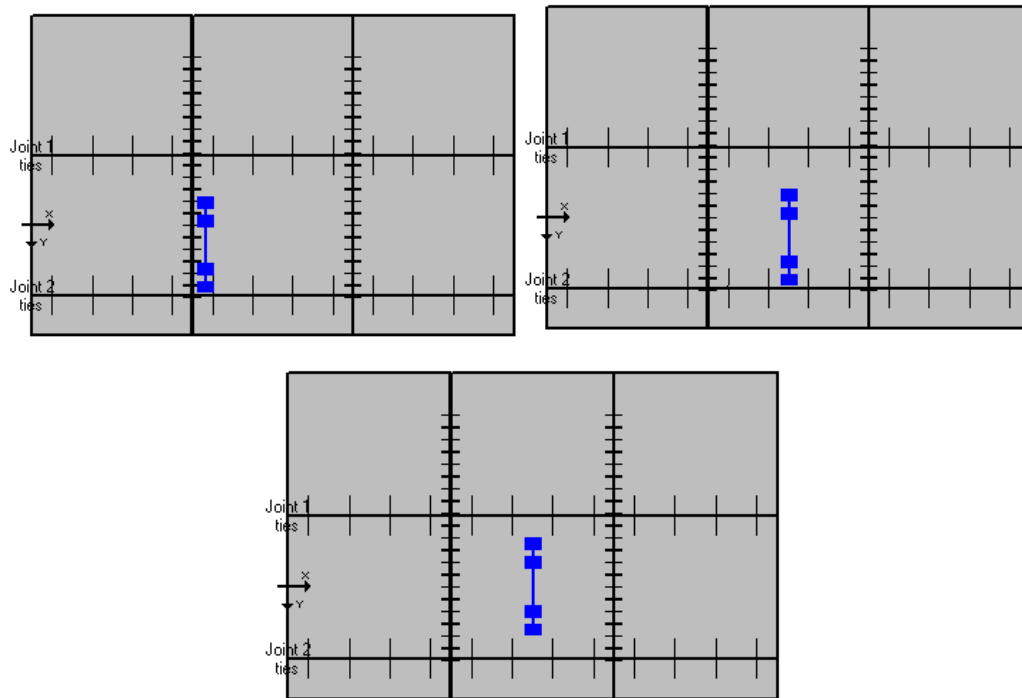
Imagen 26 Ubicación de carga eje delantero direccional en Tramo Autopista con berma



Fuente: Software EverFe 2.24.

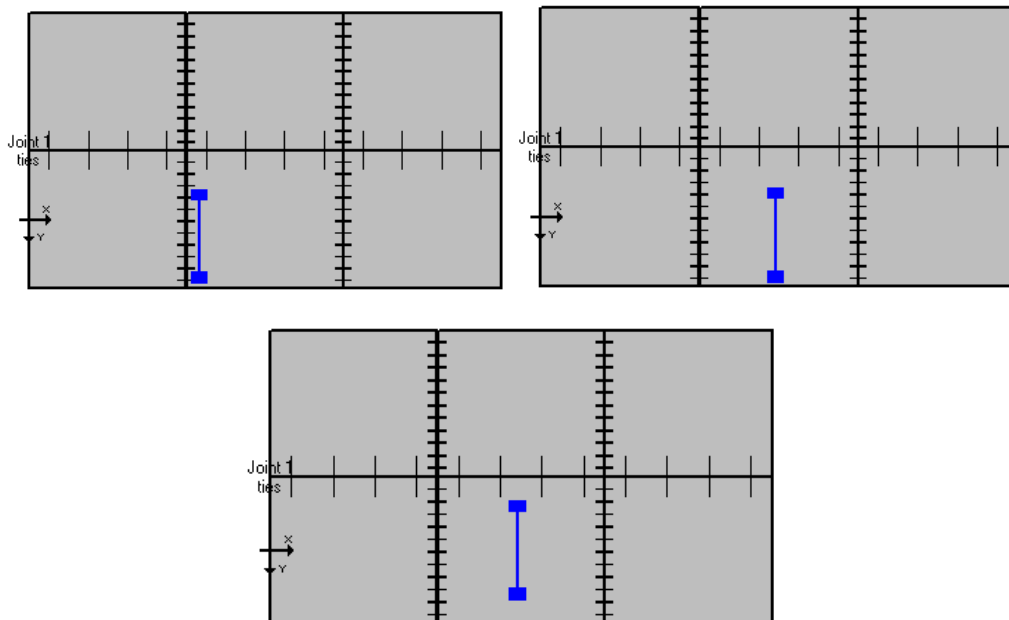
APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

Imagen 27 Ubicación de carga eje delantero direccional en Tramo Autopista con berma



Fuente: Software EverFe 2.24.

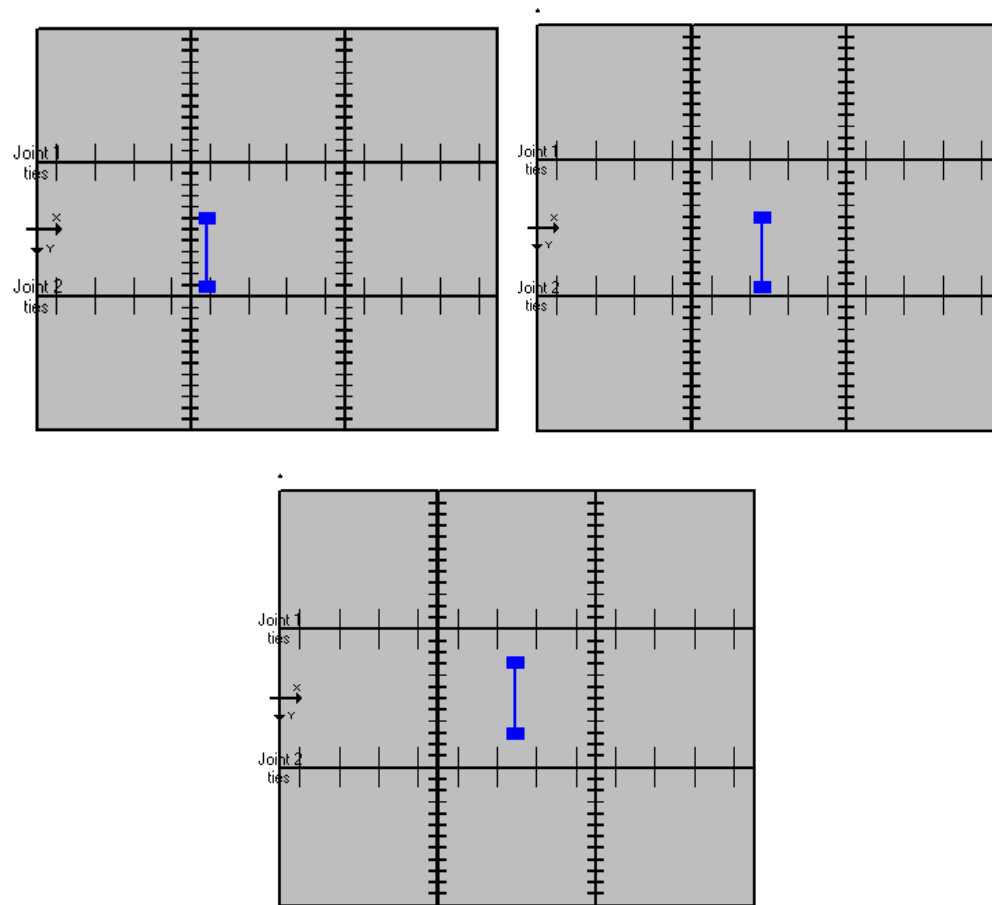
Imagen 28 Ubicación de carga eje delantero direccional en Tramo Autopista con berma



Fuente: Software EverFe 2.24.

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

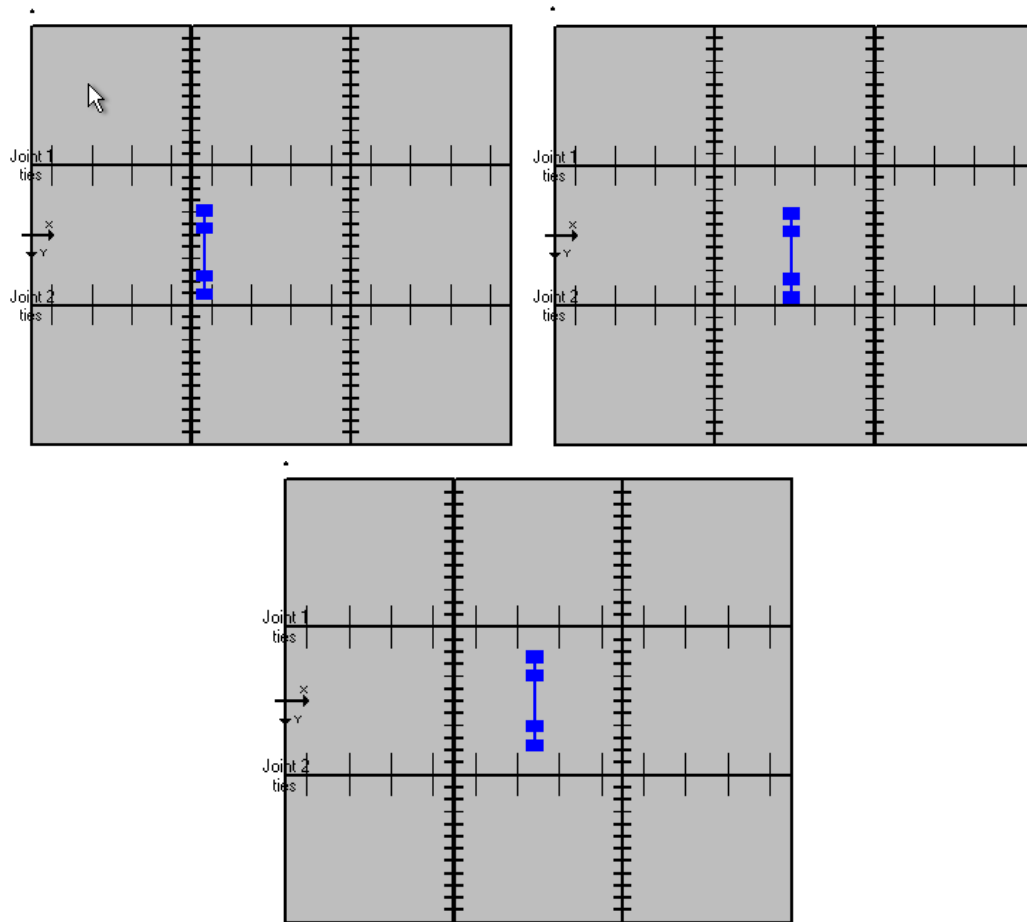
Imagen 29 Ubicación de carga eje delantero direccional en Tramo Autopista con berma



Fuente: Software EverFe 2.24.

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

Imagen 30 Ubicación de carga eje delantero direccional en Tramo Patio Taller, con berma



Fuente: Software EverFe 2.24.

4. Resultados y análisis

4.1. Resultados

Tramo Autopista

En el tramo seleccionado en la Autopista, cada losa representa un carril, por lo que el articulado circula cercano al límite externo del pavimento generando esfuerzos y deformaciones mayores que en el interior del Patio-Taller.

A continuación, se muestran los resultados de los modelos generados para el Tramo seleccionado en la Autopista, en los que se observa la variación en los valores obtenidos de esfuerzo y deformación en cada punto crítico de la losa, como resultado del análisis de los diferentes casos de estudio.

Tabla 9 Resultados esfuerzos y deformaciones máximos para tramo Autopista. Carga aplicada en el borde de la losa.

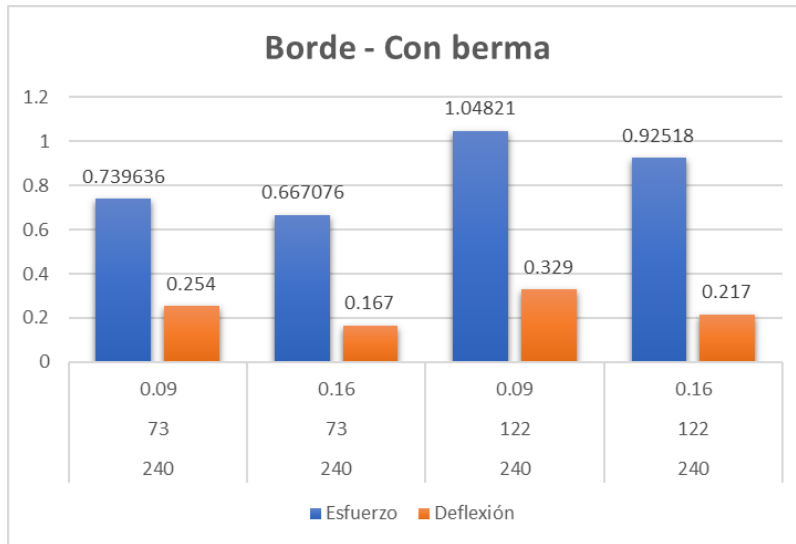
Tramo	Berma	Espesor losa	Carga	k	Posición	Esfuerzo	Deflexión
Autopista	Si	240	73	0.09	Borde	0.739636	0.254
Autopista	Si	240	73	0.16	Borde	0.667076	0.167
Autopista	Si	240	122	0.09	Borde	1.04821	0.329
Autopista	Si	240	122	0.16	Borde	0.92518	0.217
Autopista	No	300	73	0.09	Borde	0.82451	0.312
Autopista	No	300	73	0.16	Borde	0.732129	0.214
Autopista	No	300	122	0.09	Borde	1.08116	0.393
Autopista	No	300	122	0.16	Borde	0.931824	0.253

Nota: Unidades: Espesor de losa (mm), Carga (kN), k (Mpa/mm), Esfuerzo (Mpa), Deflexión (mm)

Fuente: Elaboración propia.

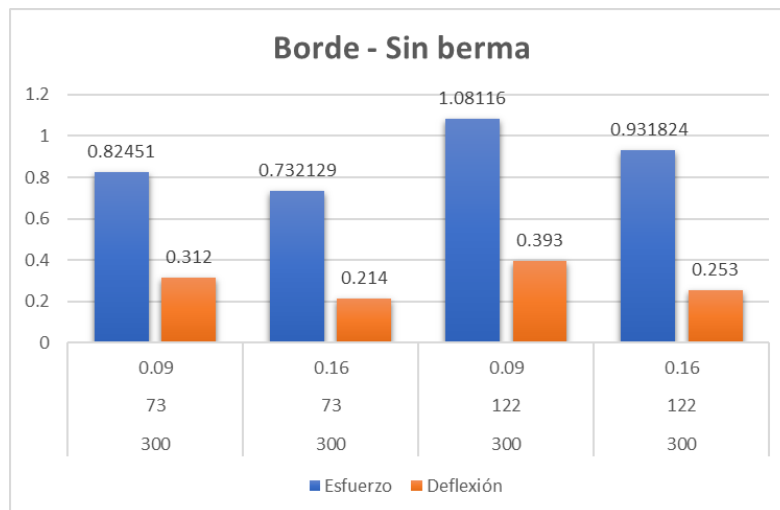
APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

Gráfica 1 Resultados esfuerzo y deformación para tramo Autopista con berma anclada. Carga aplicada en el borde de la losa.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 2 Resultados esfuerzo y deformación para tramo Autopista sin berma anclada. Carga aplicada en el borde de la losa.



Fuente: Elaboración propia.

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

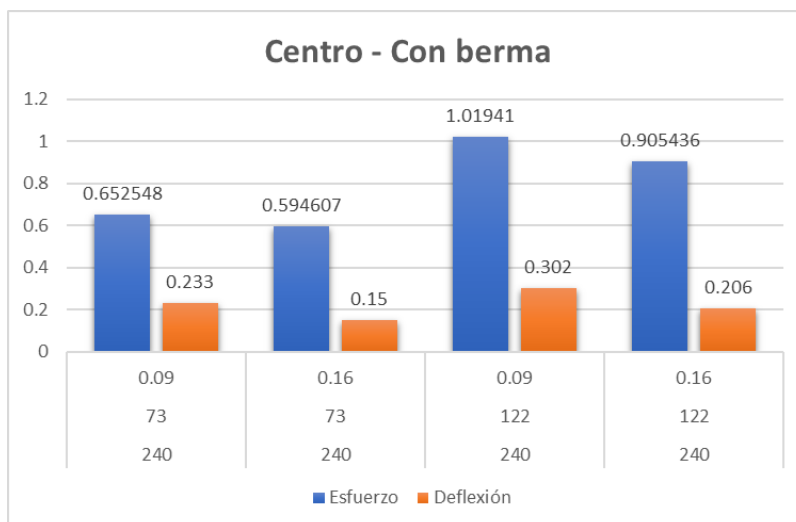
Tabla 10 Resultados esfuerzos y deformaciones máximos para tramo Autopista. Carga aplicada en el centro de la losa.

Tramo	Berma	Espesor losa	Carga	k	Posición	Esfuerzo	Deflexión
Autopista	Si	240	73	0.09	Centro	0.652548	0.233
Autopista	Si	240	73	0.16	Centro	0.594607	0.15
Autopista	Si	240	122	0.09	Centro	1.01941	0.302
Autopista	Si	240	122	0.16	Centro	0.905436	0.206
Autopista	No	300	73	0.09	Centro	0.56644	0.255
Autopista	No	300	73	0.16	Centro	0.498508	0.163
Autopista	No	300	122	0.09	Centro	0.838381	0.319
Autopista	No	300	122	0.16	Centro	0.727978	0.207

Nota: Unidades: Espesor de losa (mm), Carga (kN), k (Mpa/mm), Esfuerzo (Mpa), Deflexión (mm)

Fuente: Elaboración propia.

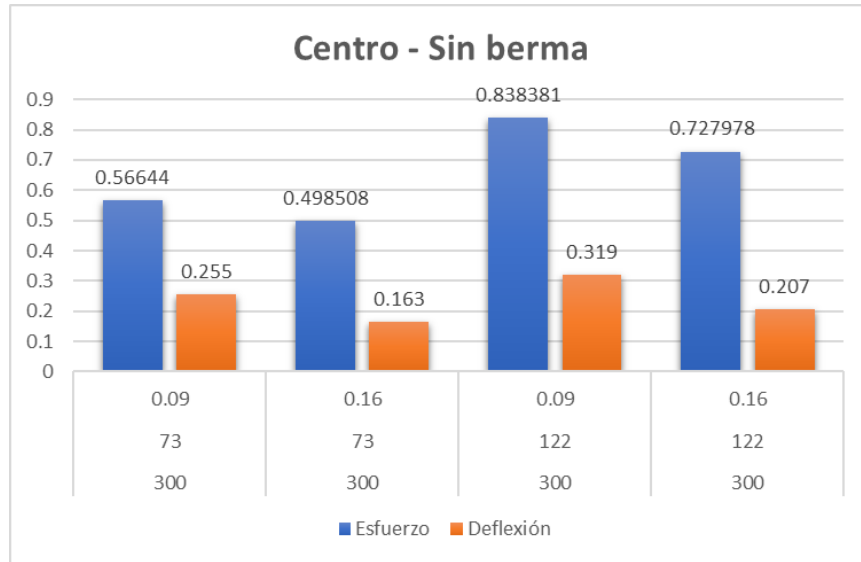
Gráfica 3 Resultados esfuerzo y deformación para tramo Autopista con berma anclada. Carga aplicada en el centro de la losa.



APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 4 Resultados esfuerzo y deformación para tramo Autopista sin berma anclada. Carga aplicada en el centro de la losa.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11 Resultados esfuerzos y deformaciones máximos para tramo Autopista. Carga aplicada en la esquina de la losa.

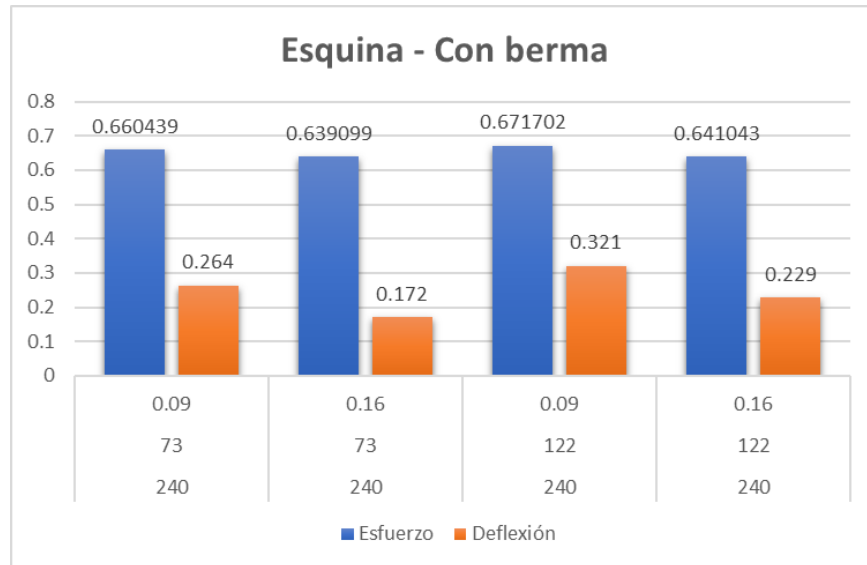
Tramo	Berma	Espesor losa	Carga	k	Posición	Esfuerzo	Deflexión
Autopista	Si	240	73	0.09	Esquina	0.660439	0.264
Autopista	Si	240	73	0.16	Esquina	0.639099	0.172
Autopista	Si	240	122	0.09	Esquina	0.671702	0.321
Autopista	Si	240	122	0.16	Esquina	0.641043	0.229
Autopista	No	300	73	0.09	Esquina	0.462198	0.326
Autopista	No	300	73	0.16	Esquina	0.44471	0.216
Autopista	No	300	122	0.09	Esquina	0.572625	0.423
Autopista	No	300	122	0.16	Esquina	0.544843	0.277

Nota: Unidades: Espesor de losa (mm), Carga (kN), k (Mpa/mm), Esfuerzo (Mpa), Deflexión (mm)

Fuente: Elaboración propia.

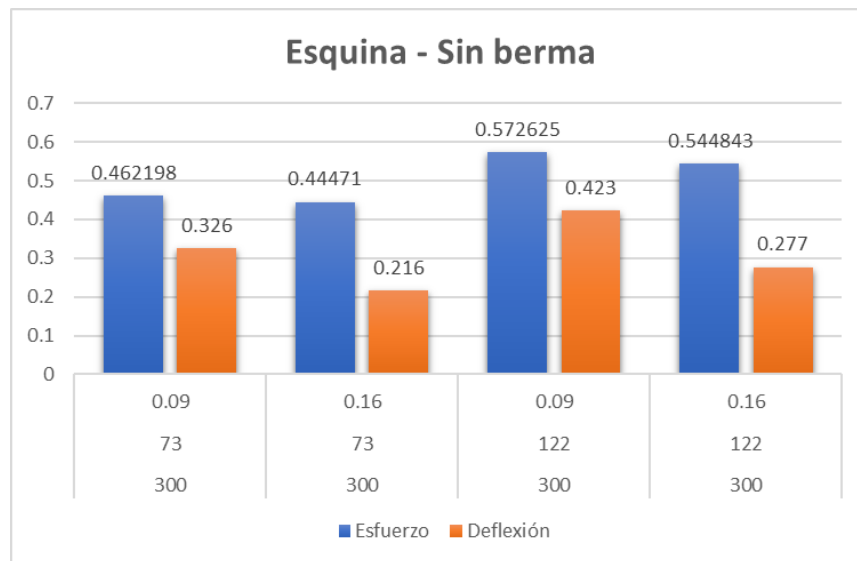
APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

Gráfica 5 Resultados esfuerzo y deformación para tramo Autopista con berma anclada. Carga aplicada en la esquina de la losa.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 6 Resultados esfuerzo y deformación para tramo Autopista sin berma anclada. Carga aplicada en la esquina de la losa.



Fuente: Elaboración propia.

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

Tramo Patio-Taller

Como se menciona anteriormente, dado que la zona seleccionada pertenece a un patio de TransMilenio, se trata de un área mucho mayor compuesta por un gran número de losas contiguas en todos los sentidos, lo que genera un mejor soporte y transmisión de cargas entre las losas, y esto implica una reducción en los esfuerzos y deformaciones ya que la aplicación de las cargas no se da en las mismas condiciones. Solamente las losas de borde podrían estar sometidas a esfuerzos mayores que las internas.

Tabla 12 Resultados esfuerzos y deformaciones máximos para tramo Patio-Taller. Carga aplicada en el borde de la losa.

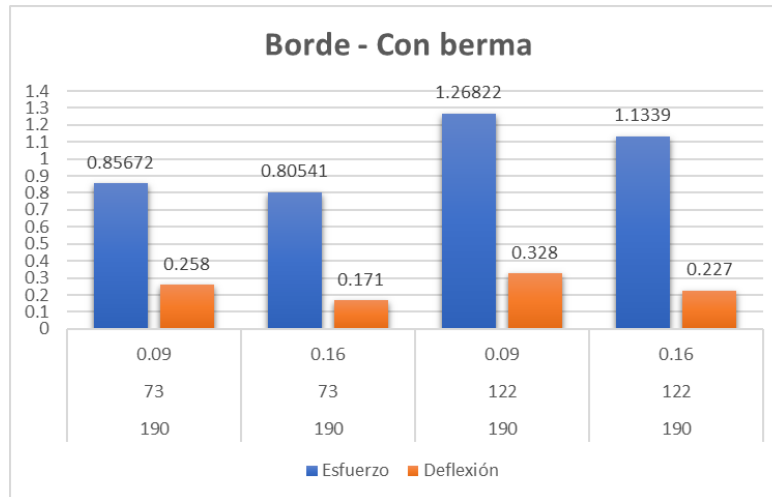
Tramo	Berma	Espesor losa	Carga	k	Posición	Esfuerzo	Deflexión
Patio-Taller	Si	190	73	0.09	Borde	0.85672	0.258
Patio-Taller	Si	190	73	0.16	Borde	0.80541	0.171
Patio-Taller	Si	190	122	0.09	Borde	1.26822	0.328
Patio-Taller	Si	190	122	0.16	Borde	1.1339	0.227
Patio-Taller	No	210	73	0.09	Borde	0.819181	0.255
Patio-Taller	No	210	73	0.16	Borde	0.80918	0.167
Patio-Taller	No	210	122	0.09	Borde	1.19082	0.327
Patio-Taller	No	210	122	0.16	Borde	1.06526	0.22

Nota: Unidades: Espesor de losa (mm), Carga (kN), k (Mpa/mm), Esfuerzo (Mpa), Deflexión (mm)

Fuente: Elaboración propia.

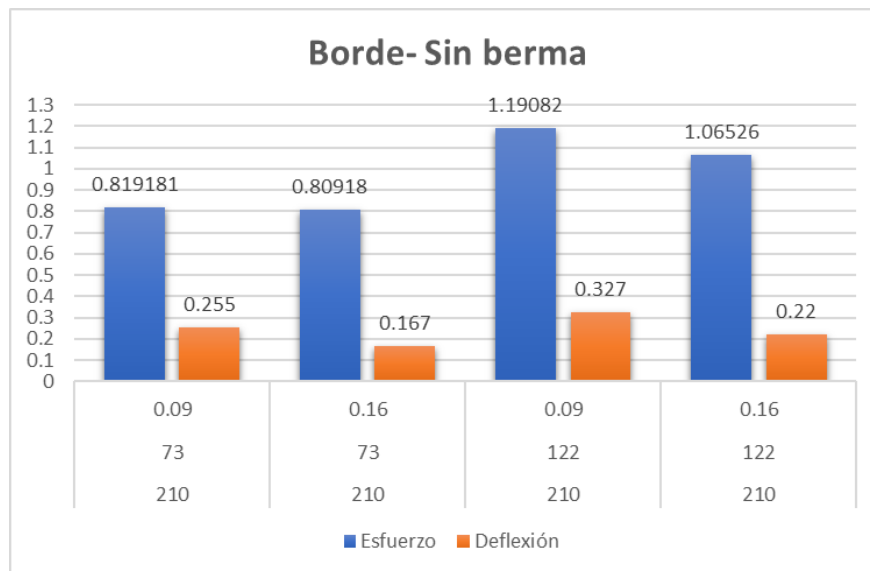
Gráfica 7 Resultados esfuerzo y deformación para tramo Patio-Taller diseño con berma. Carga aplicada en el borde de la losa.

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 8 Resultados esfuerzo y deformación para tramo Patio-Taller diseño sin berma. Carga aplicada en el borde de la losa.



Fuente: Elaboración propia

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

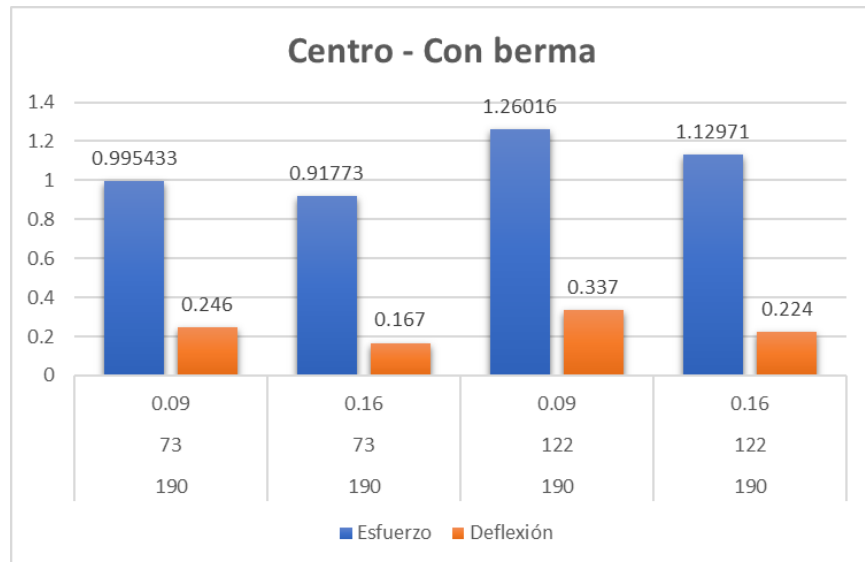
Tabla 13 Resultados esfuerzos y deformaciones máximos para tramo Patio-Taller. Carga aplicada en el centro de la losa.

Tramo	Berma	Espesor losa	Carga	k	Posición	Esfuerzo	Deflexión
Patio-Taller	Si	190	73	0.09	Centro	0.995433	0.246
Patio-Taller	Si	190	73	0.16	Centro	0.91773	0.167
Patio-Taller	Si	190	122	0.09	Centro	1.26016	0.337
Patio-Taller	Si	190	122	0.16	Centro	1.12971	0.224
Patio-Taller	No	210	73	0.09	Centro	0.819181	0.256
Patio-Taller	No	210	73	0.16	Centro	0.676459	0.158
Patio-Taller	No	210	122	0.09	Centro	1.11201	0.321
Patio-Taller	No	210	122	0.16	Centro	1.05419	0.216

Nota: Unidades: Espesor de losa (mm), Carga (kN), k (Mpa/mm), Esfuerzo (Mpa), Deflexión (mm)

Fuente: Elaboración propia.

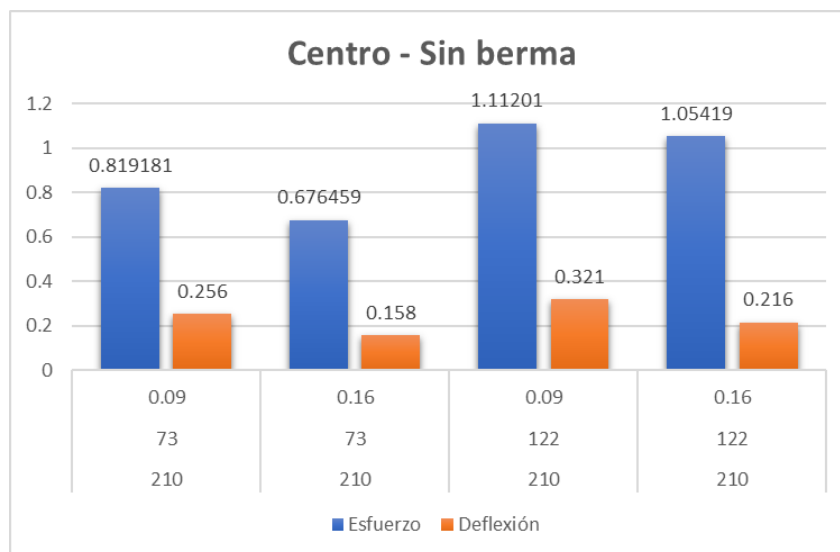
Gráfica 9 Resultados esfuerzo y deformación para tramo Patio-Taller diseño con berma. Carga aplicada en el centro de la losa.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 10 Resultados esfuerzo y deformación para tramo Patio-Taller diseño sin berma. Carga aplicada en el centro de la losa.

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO



Fuente: Elaboración propia

Tabla 14 Resultados esfuerzos y deformaciones máximos para tramo Patio-Taller. Carga aplicada en la esquina de la losa.

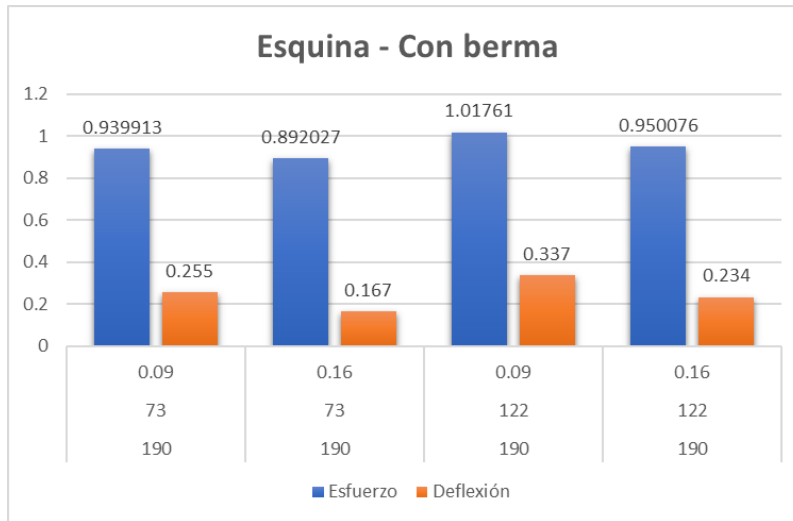
Tramo	Berma	Espesor losa	Carga	k	Posición	Esfuerzo	Deflexión
Patio-Taller	Si	190	73	0.09	Esquina	0.939913	0.255
Patio-Taller	Si	190	73	0.16	Esquina	0.892027	0.167
Patio-Taller	Si	190	122	0.09	Esquina	1.01761	0.337
Patio-Taller	Si	190	122	0.16	Esquina	0.950076	0.234
Patio-Taller	No	210	73	0.09	Esquina	0.804271	0.255
Patio-Taller	No	210	73	0.16	Esquina	0.760724	0.167
Patio-Taller	No	210	122	0.09	Esquina	0.871482	0.281
Patio-Taller	No	210	122	0.16	Esquina	0.814665	0.221

Nota: Unidades: Espesor de losa (mm), Carga (kN), k (Mpa/mm), Esfuerzo (Mpa), Deflexión (mm)

Fuente: Elaboración propia.

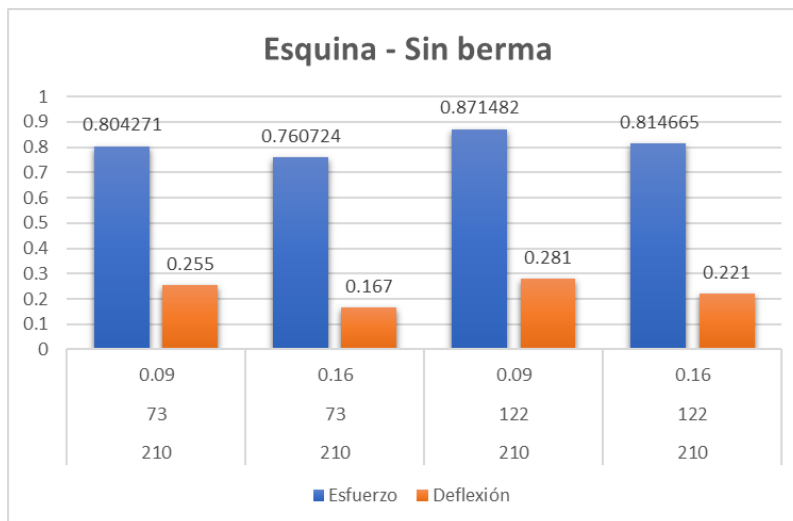
Gráfica 11 Resultados esfuerzo y deformación para tramo Patio-Taller diseño con berma. Carga aplicada en el centro de la losa.

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 12 Resultados esfuerzo y deformación para tramo Patio-Taller diseño sin berma. Carga aplicada en el centro de la losa.



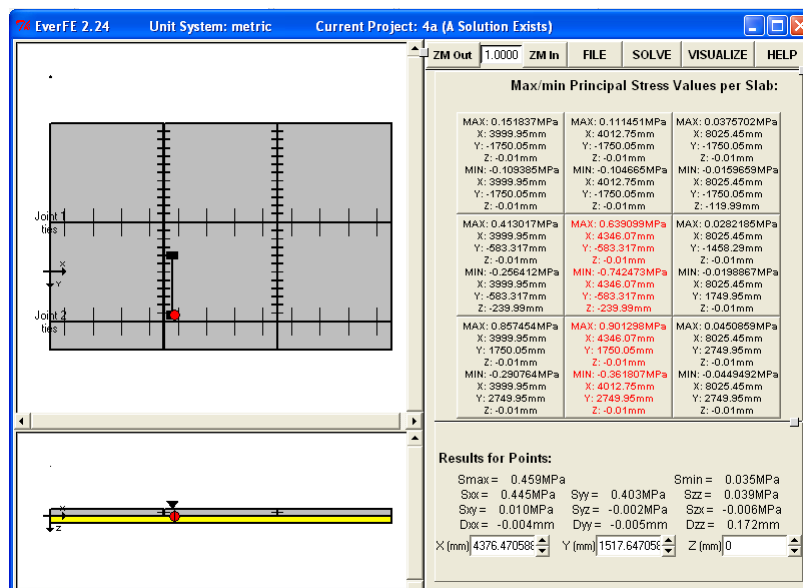
Fuente: Elaboración propia

En el primer análisis de elementos finitos, se pudo observar algunas particularidades en los resultados obtenidos:

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

- Los esfuerzos obtenidos para las cargas aplicadas en la esquina de la losa resultan ser menores que los demás, incluyendo a los que resultan de las cargas aplicadas en el centro, esto es posible ya que el software tiene en cuenta la transferencia de carga tanto a la berma anclada (que se comporta como una losa de menor tamaño), como a la losa anterior, generando esfuerzos mucho mayores en las mismas. Como se muestra en la siguiente imagen la losa cargada presenta un esfuerzo máximo de 0.64 Mpa, mientras que en la berma se tienen valores de 0.86 y 0.9 Mpa.

Imagen 31 Resultados esfuerzo y deformación en EverFe para carga en esquina de la losa con berma anclada.



Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, se puede observar que los esfuerzos obtenidos en los modelos con espesor de losa de 24 cm con berma son mayores a los obtenidos en los modelos con espesor de losa de 30 cm, sin embargo, las deformaciones son menores. Esto permite comprender que el espesor de losa cumple un papel importante en la reducción de esfuerzos, a pesar de esto el software indica que las deflexiones se mantienen similares.

Efecto de berma

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

Partiendo de los resultados mencionados, se considera conveniente un nuevo análisis de modelos de elementos finitos en el que se comparen los esfuerzos obtenidos para espesores de losa constantes con y sin berma, y posiciones de carga en los puntos críticos, obteniendo los siguientes resultados:

- Como se puede observar en la siguiente Tabla, la presencia de la berma anclada disminuye notablemente los esfuerzos y deformaciones en las dos situaciones de estudio; también es posible determinar que la situación más crítica es la aplicación de carga sobre el borde de losa ya que genera esfuerzos y deformaciones mucho mayores que las cargas aplicadas sobre la esquina de la lo

Tabla 15 Resultados esfuerzos y deformaciones máximos para tramo Autopista con espesor constante de 24 cm.

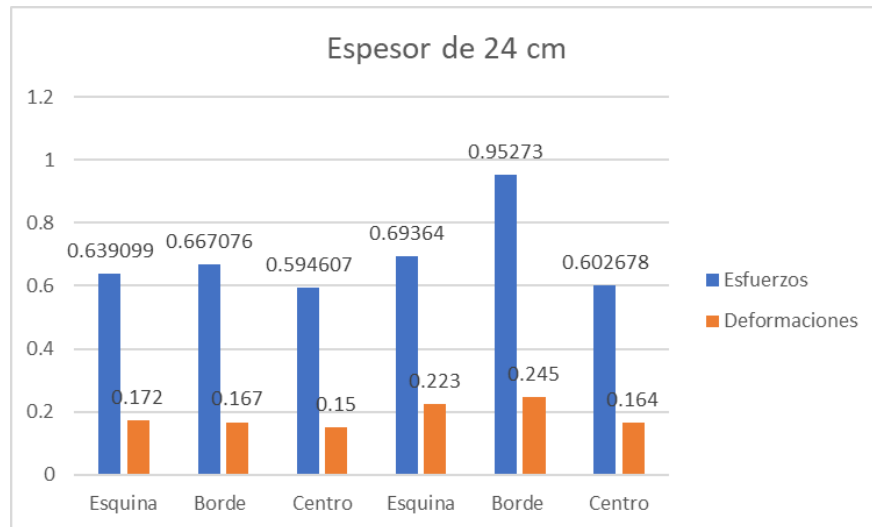
Tramo	Berma	Espesor losa	Carga	k	Posición	Esfuerzo	Deflexión
Autopista	con berma	240	75	0.16	Esquina	0.639099	0.172
Autopista	con berma	240	75	0.16	Borde	0.667076	0.167
Autopista	con berma	240	75	0.16	Centro	0.594607	0.15
Autopista	sin berma	240	75	0.16	Esquina	0.69364	0.223
Autopista	sin berma	240	75	0.16	Borde	0.95273	0.245
Autopista	sin berma	240	75	0.16	Centro	0.602678	0.164

Nota: Unidades: Espesor de losa (mm), Carga (kN), k (Mpa/mm), Esfuerzo (Mpa), Deflexión (mm)

Fuente: Elaboración propia.

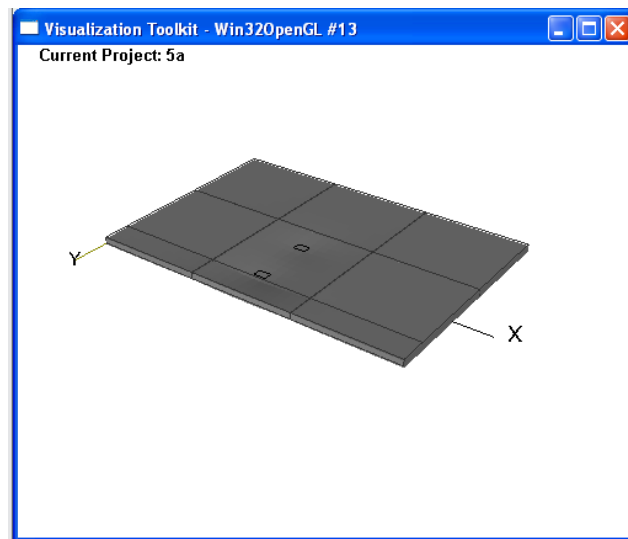
Gráfica 13 Resultados esfuerzo y deformación para tramo Autopista con y sin berma anclada.

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO



Fuente: Elaboración propia

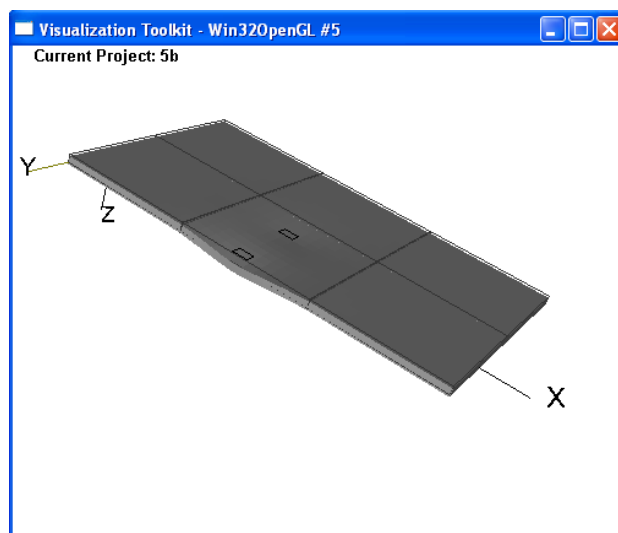
Imagen 32 Deformación de distribución de losas tramo Autopista con berma anclada para espesor de 30.



Fuente: Elaboración propia

Imagen 33 Deformación de distribución de losas tramo Autopista sin berma anclada para espesor de 30.

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO



Fuente: Elaboración propia

Tabla 16 Resultados esfuerzos y deformaciones máximos para tramo Autopista con espesor constante de 30 cm.

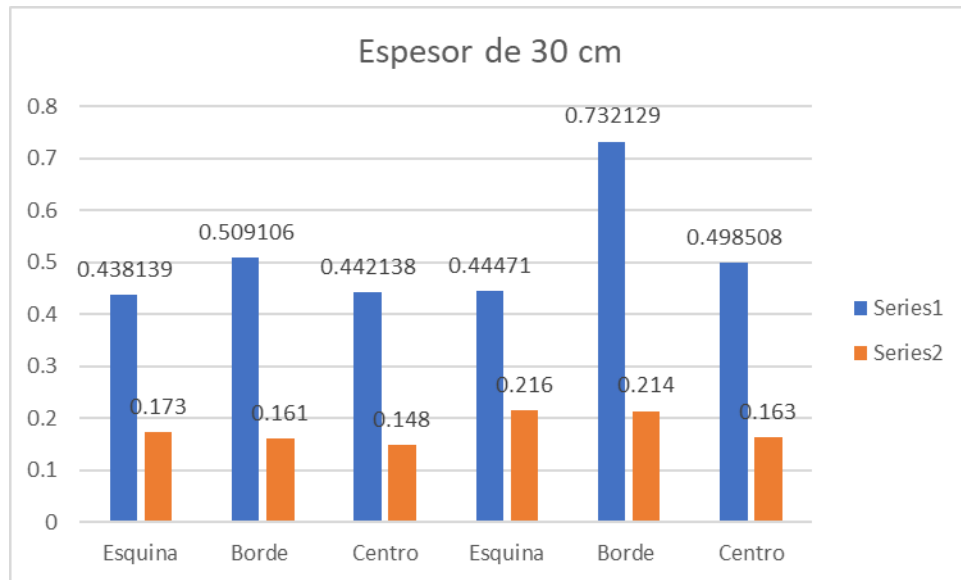
Tramo	Berma	Espesor losa	Carga	k	Posición	Esfuerzo	Deflexión
Autopista	con berma	300	75	0.16	Esquina	0.438139	0.173
Autopista	con berma	300	75	0.16	Borde	0.509106	0.161
Autopista	con berma	300	75	0.16	Centro	0.442138	0.148
Autopista	sin berma	300	75	0.16	Esquina	0.44471	0.216
Autopista	sin berma	300	75	0.16	Borde	0.732129	0.214
Autopista	sin berma	300	75	0.16	Centro	0.498508	0.163

Nota: Unidades: Espesor de losa (mm), Carga (kN), k (Mpa/mm), Esfuerzo (Mpa), Deflexión (mm)

Fuente: Elaboración propia.

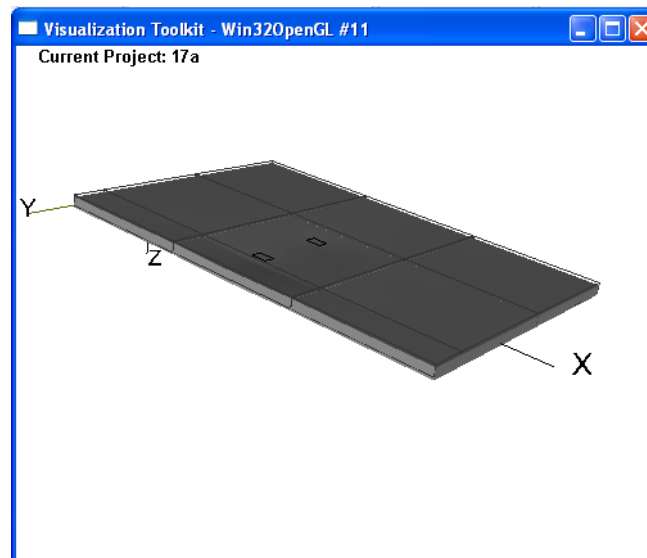
Gráfica 14 Resultados esfuerzo y deformación para tramo Autopista con y sin berma anclada.

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO



Fuente: Elaboración propia

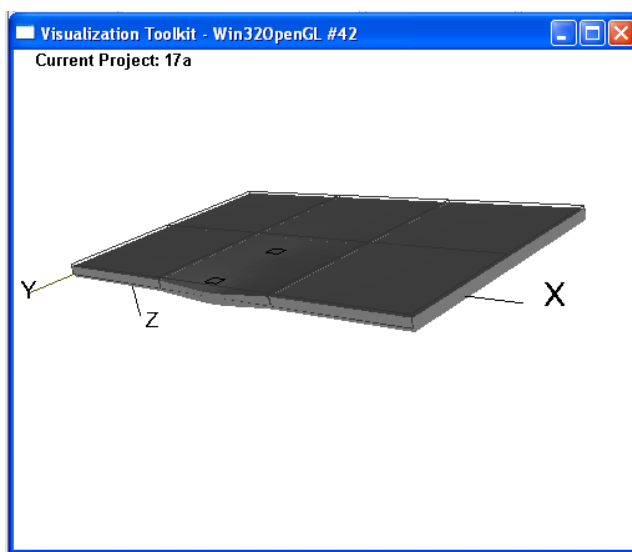
Imagen 34 Deformación de distribución de losas tramo Autopista con berma anclada para espesor de 30 cm.



Fuente: Elaboración propia

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

Imagen 35 Deformación de distribución de losas tramo Autopista sin berma anclada para espesor de 30 cm.



Fuente: Elaboración propia

Ecuaciones Westergaard y Ioannides

Teniendo en cuenta que, las ecuaciones de cálculo de esfuerzos y deformaciones de Westergaard y Ioannides están diseñadas para una sola carga ubicada en los 3 puntos críticos de la losa, se generó una tercera modelación en la que se analiza el comportamiento de una sola losa cargada en 3 puntos críticos por una sola llanta de 75 kN, como se puede observar en las Tablas 17 y 18 los resultados de las ecuaciones tienden a ser mucho más conservadores que los del análisis de modelos finitos.

Tabla 17 Comparación entre esfuerzos obtenidos de EverFe 2.24. y aplicación de ecuaciones Westergaard y Ioannides espesor de 24 cm

Tramo	Espesor losa	Carga	k	Posición	EverFe		Westergaard		%
					Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación	
Autopista	240	75	0.16	Esquina	1.818	0.973	2.224	0.000	22.3
Autopista	240	75	0.16	Borde	2.172	0.458	3.261	0.384	50.1
Autopista	240	75	0.16	Centro	1.381	0.203	1.682	0.000	21.8

Nota: Unidades: Espesor de losa (mm), Carga (kN), k (Mpa/mm), Esfuerzo (Mpa), Deflexión (mm)

Fuente: Elaboración propia.

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

Tabla 18 Comparación entre esfuerzos obtenidos de EverFe 2.24. y aplicación de ecuaciones Westergaard y Ioannides espesor de 30 cm

Tramo	Espesor losa	Carga	k	Posición	EverFe		Westergaard		%
					Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación	
Autopista	300	75	0.16	Esquina	1.321	0.783	1.529	0.000	15.8
Autopista	300	75	0.16	Borde	1.530	0.370	2.271	0.282	48.5
Autopista	300	75	0.16	Centro	0.945	0.178	1.111	0.000	17.6

Nota: Unidades: Espesor de losa (mm), Carga (kN), k (Mpa/mm), Esfuerzo (Mpa), Deflexión (mm)

Fuente: Elaboración propia.

4.2. Análisis de Resultados:

Los modelos se corrieron todos para las condiciones de espesores admisibles con y sin berma. Esto es, en el exterior del patio, en la Autopista del Sur, el análisis con el método de elementos finitos demostró que, en caso de adoptar que las cargas se aplican dentro de la losa (centro), sistemáticamente se obtienen menores esfuerzos que cuando se aplican en el borde o esquina de las losas. Los cálculos confirman, por tanto, las previsiones de las formulaciones teóricas, si bien la magnitud de los esfuerzos es mayor con las fórmulas que los valores que se obtienen de los modelos FEM.

De otra parte, sistemáticamente también, en el estudio con EverFE, para losas con espesores obtenidos en el diseño BsPCAA con berma se obtienen valores muy inferiores de esfuerzos a los que resultan, en las mismas posiciones, del análisis con espesor de diseño “sin berma”.

Como conclusión fundamental, teniendo en cuenta las discusiones teóricas y los análisis de diseño con BsPCAA y con elementos finitos (EverFE) a lo largo de este documento, se confirma que resulta desfavorable la aplicación de cargas en el borde libre de losas de pavimento de concreto, dado que producen mayores esfuerzos de flexión en la losa y, en consecuencia, mayores deflexiones, lo cual induce más altos consumos de fatiga y mayor relación de trabajo en el desplazamiento, con más alto consumo de erosión. En estas condiciones, resulta evidente que, a

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

medida que la carga externa (llanta o pareja de llantas) pisen con mayor frecuencia el borde libre se tendrán efectos más críticos.

De acuerdo con Tayabji (1984) el método PCA condensado en figuras, acumuló las repeticiones de carga considerando que, cuando se introduzca el efecto de berma, hasta el 6% de las cargas, en el modelo JSAB se consideraron circulando en la franja de 1' (30cm) del borde libre de las losas. En contraste, las gráficas se prepararon para que el efecto de no berma se considere con 94% de las cargas pisando el borde de la losa. Por supuesto, las gráficas de tendencias, construidas a partir del análisis con Elementos Finitos en el programa JSLAB son las consideradas en las correlaciones plasmadas en fórmulas que se incluyen en el programa BsPCAa y en otros programas de naturaleza similar.

Los análisis ejecutados en esta investigación muestran que la diferencia en espesor requerido para los dos extremos de hipótesis en este aspecto (con y sin berma) distan en el orden de 3 a 5 cm, con mayor espesor para la consideración de no berma. En consecuencia, la hipótesis de NO BERMA considerada en los términos de referencia del IDU implica una inversión mayor en concreto de losas, del orden de 12 a 20%, dependiendo de la magnitud de las cargas, el espesor de losa, el módulo de rotura y la capacidad mecánica del apoyo.

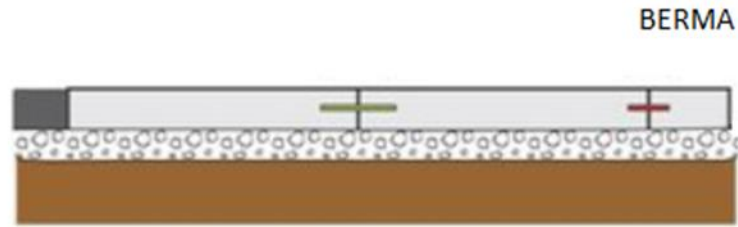
Es obvio que una primera consideración del diseñador fuese la de lograr, de todas maneras, que existiese la berma o una condición que garantizara que él se presenta. Tendría las siguientes alternativas:

- a. Construir un ancho adicional de losa al requerido, al menos de 1' (30cm), por fuera del carril y sin posibilidades de ser pisado por los vehículos, de manera que las cargas siempre circulen a una distancia al borde al menos de ese orden. Incrementar el ancho de losa hace que también se incrementen los esfuerzos de flexión, lo cual resulta desfavorable. Los modelos preparados por AASHTO (2002) muestran que el porcentaje de losas falladas crecen a medida que se incrementa el ancho de las mismas.

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

- b. Construir la berma efectiva en ancho mayor a 1' (usual trabajar al menos 1m de ancho adicional para evitar que la esbeltez conduzca a la fractura). La cual deberá separarse por una junta longitudinal, dotada de barras de anclaje y, debido a la forma irregular, tendrá que reforzarse.

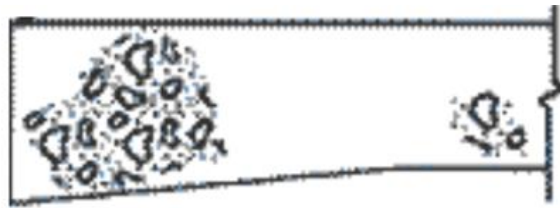
Imagen 36 Ilustración de estructura con berma anclada.



Fuente Internet. SR.

- c. Construir un sobreespesor en la parte inferior de la losa, lo cual se suele hacer en forma de chaflán. El procedimiento pretende generar, en el borde, al menos el espesor correspondiente a la losa sin efecto berma en un ancho del orden mínimo de 1'. La construcción en chaflán busca que haya una transición para que no se presente debilidad que induzca fracturación con un cambio local de espesor. Si bien la idea es válida y ha probado ser exitosa, genera serias dificultades constructivas.

Imagen 37 Ilustración de aumento de espesor en laterales de la losa.

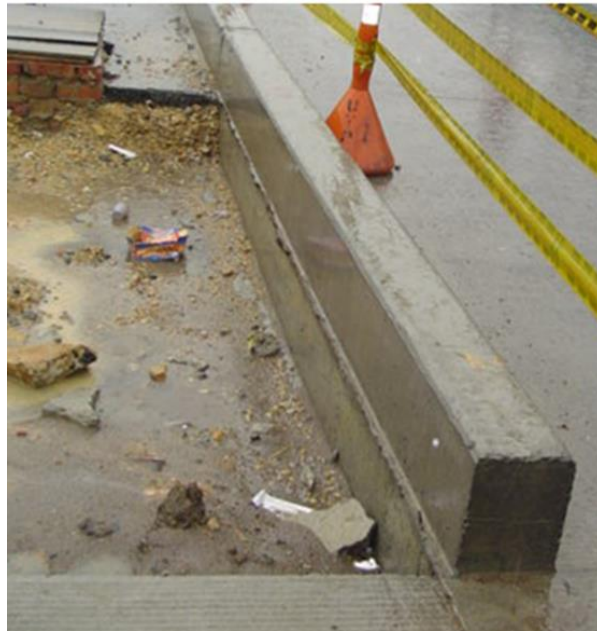


Fuente Internet. SR.

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

d. Implantar bordillos o sardineles integrales. Se trata de construir las losas e implantar, en el concreto aún fresco barras de esfuerzo cortante (en forma de U invertida) que permitirán fundir, después de fraguada la losa, sardineles en concreto adheridos a ella, los cuales no solo impedirán que las llantas se acerquen al borde, sino que, además, proporcionarán rigidez adicional en el borde de la losa que reduce las deflexiones, generando el efecto de berma buscado. Esta metodología es muy utilizada en los pavimentos de Transmilenio, si bien conspira contra la necesidad de industrializar los procesos.

Imagen 38 Losa con sardinel integral



Fuente: Propia

Imagen 39 Losa con bordillo integral y sobreancho

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO



Fuente. Propia

e. Colocar bandas sonoras (“rumble strips”) en el borde de losa, que obliguen a los conductores a alejar el vehículo, centrando las cargas por fuera de los 30cm. El sistema es muy utilizado en otros países, pero en Bogotá no han contado con el favor de los constructores y diseñadores y se ha argumentado que resultarían peligrosas para ciclistas y motociclistas que pudiesen circular por esas calzadas. La sonoridad se logra generando vacíos en la losa aún fresca o ligeras protuberancias, de manera artesanal, con el concreto aún fresco.

Imagen 40 *Bandas sonoras.*

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO



Fuente: Internet. Slideplayer. SR

Entre las condiciones citadas, la más frecuentemente adoptada por diseñadores y constructores en Bogotá, ha sido la de generar bordillos integrales. Esto tiene la ventaja adicional de que no facilita el ingreso de agua en el borde de losa, que sí suele ocurrir con bordillos adosados, como se ha observado particularmente en la Troncal Avenida Caracas, de la calle 6a hacia el norte.

La segunda posición puede ser la de considerar que las cargas siempre se mantienen alejadas del borde de losa, debido a que el pavimento tiene bordillos integrales o adosados (en el caso de bordillos prefabricados) que inducen a no pisar el borde. En este documento se ha demostrado que la costumbre es no pisar nunca el borde de losa, así que esta posición técnica estaría soportada por la realidad mostrada en el estudio de campo de esta investigación.

Algunos diseñadores argumentan que el borde de losa se pisa frecuentemente en la junta central o en las juntas centrales, en el caso de más de un carril. El punto de vista citado no tiene asidero siempre y cuando en la junta central existan barras de transferencia y, con mayor razón, cuando se decida inducir llave o “machihembra” en ella. De hecho, el efecto de berma se logra con

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

un fragmento de losa conectado por medio de barras de transferencia, así que existe, con mayor razón en el caso de las dos losas unidas con anclajes. En Bogotá, el pavimento de Transmilenio no ha tenido el uso de llaves o machiembres porque ha sido fuente de fallas en otros pavimentos viales de la ciudad, al generar debilidades.

La tercera posición probable, podría ser la de considerar un “efecto parcial de berma”, que tenga en cuenta que en el “SI BERMA” el 94% de las cargas circulan en el interior de la losa y solo el 6% en el borde, y en el “NO BERMA” se incluye el 94% de las cargas circulando sobre el borde y solo el 6% en el interior de losa.

La selección de ese “efecto parcial” estaría en manos del diseñador, o en criterio de la entidad, considerando la sección de pavimento, el uso (cerca de estaciones o en sitios de entrecruzamiento o en intersecciones, o condiciones similares, en las cuales se tenga duda sobre la eficiencia de la transferencia en la junta longitudinal o transversal, o en que se tengan transiciones a pavimentos flexibles o similares. Este enfoque fue aplicado por los diseñadores de los pavimentos del proyecto Transmilenio Soacha 2, y Patio El Vínculo. Consistiría en ejecutar análisis de sensibilidad de diseño con y sin bermas y adelantar interpolaciones entre las dos. Para el proyecto citado, se ejecutaron de forma lineal.

De acuerdo con Tayabji (1984), la berma es importante en los pavimentos rígidos no solamente para transferir cargas en el efecto de berma sino, también, para evitar la infiltración que puede provocar ablandamientos en el apoyo del borde de la losa y facilitar la acumulación bajo ella, que induciría problemas de bombeo (erosión). Adicionalmente, el mismo autor menciona la influencia desfavorable de la probable congelación, factor que no genera preocupación en este caso. Por supuesto, la probable ocurrencia del ablandamiento del soporte es desfavorable y debe evitarse. No obstante, ese no es el caso de los pavimentos de Transmilenio, siempre bordeados por espacio público o estaciones. Debe, sin embargo, cuidarse especialmente este aspecto cuando el espacio central se deje en zona verde. Allí deberán construirse sobreanchos

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

al menos de 1' (30,5cm) dotados de infraestructura completa, que provean confinamiento lateral suficiente y, resulta conveniente, estudiar la posibilidad de generar sistemas de subdrenaje.

5. Conclusiones

El ejemplo de los pavimentos de Bogotá se ha extendido por todo el país, como suele ocurrir con todas las técnicas de la ingeniería, con lo cual es de suma importancia que se investiguen las actividades ejecutadas, los detalles aprendidos, y las necesidades de investigación para el futuro, buscando impedir que se repitan los errores y lograr procesos correctos y económicos.

Los pavimentos del sistema Transmilenio en la ciudad de Bogotá empezaron a construirse en el año 1998, con la idea de generar un Sistema de Transporte masivo en buses (BRT) en varias vías principales, conformando una red de vías Troncales. Las primeras construidas fueron la Autopista Norte y la Avenida Caracas, ambas pavimentadas en concreto. Simultáneamente se continuaba la construcción, con una filosofía diferente, para formar parte del llamado Sistema Solobús, la Calle 80, en pavimento flexible. Sobre la marcha, fue incorporada al sistema Transmilenio, lo cual implicó cambio en las cargas y frecuencias del tránsito, en relación con las que se habían utilizado en el diseño.

Las dos primeras troncales mencionadas con pavimento de concreto, se diseñaron para utilizar capas inferiores de concreto asfáltico, con la técnica de Whitetopping, que pretendía generar un pavimento mixto, con los adheridas. Fallaron, de manera muy precoz, por factores asociados con los materiales y su escasa resistencia a la erosión, y no con la condición de berma.

La Troncal Calle 80 presentó problemas asociados con las cargas especiales de los vehículos, para los cuales las capas de concreto asfáltico no fueron concebidas en el diseño.

Después de las mencionadas, se construyeron la Troncal Calle 13 entre la Carrera 10ª y Puente Aranda, la Avenida de La Américas, a continuación, hasta la Avenida Ciudad de Cali, y ésta hasta el Portal Américas. Las tres fueron diseñadas y construidas con espesores de losa entre 22 y 24cm, sin considerar efecto berma, y aún están en operación, cerca de 20 años después, periodo

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

para el cual fueron diseñadas, sin fallas precoces y con muy escaso porcentaje de losas falladas, de manera que con labores de mantenimiento escasas pueden aún servir por un largo periodo, justificando la inversión pública ejecutada. Algunos esfuerzos importantes de diseño fueron implantados en mejoramiento del soporte de las losas, en sistemas de subdrenaje, en cuidar la resistencia a la erosión de los materiales inferiores, a raíz del aprendizaje del comportamiento en las primeras troncales y, en las técnicas constructivas.

De los comportamientos citados, se concluye que los pavimentos de Transmilenio diseñados asumiendo que existe efecto de berma solo han fallado precozmente por deficiencias de materiales e hipótesis de diseño diferentes a la del efecto berma.

Seguidamente se construyeron las Troncales Avenida Suba y NQS en las cuales se consideró generar un efecto de berma de diferentes maneras (bermas incluidas, losas ensanchadas, bordillos o sardineles integrales). La implantación fue muy exitosa en la Avenida Suba y en la NQS tramo sur, con muy escasos niveles de daño, a punto de alcanzar los 20 años de operación con menores intervenciones de mantenimiento. Solamente la Avenida NQS tramos norte y centro tiene un porcentaje de daños algo mayor del estimado, en general asociado con problemas de apoyo en zonas de canal central o con deficiencias de subdrenaje y apoyos ablandados. De ellas se concluye que las causas de fallas prematuras tampoco son atribuibles a las hipótesis de berma.

La tercera etapa del Sistema Transmilenio incluyó la Carrera 10ª y la Calle 26, en donde la entidad decidió incluir en los términos contractuales marcados Factores de Seguridad:

- Diseño sin considerar efecto de berma,
- Cargas máximas por eje, sin distribución diferencial a lo largo del día.
- Factor de Seguridad de Carga de 1,2 y de repeticiones de cargas de 1,1

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

En los últimos proyectos, aún en etapa de diseño o construcción, aparte de las limitaciones anteriores, se ha controlado también la ingeniería de valor, fijando los espectros de cargas, solicitando el uso de determinados materiales y controlan los acumulados máximos de daño con los criterios de falla, e incluso impidiendo los cambios de espesores. Los espesores de losa en general están por encima de 30cm, que comparativamente con los que se utilizan en vías de tráfico pesado de otros países resultan, al menos superiores, o exagerados.

De las experiencias citadas, se concluye que el diseño estructural de los pavimentos del Sistema Transmilenio ha evolucionado positivamente debido a la comprensión de los mecanismos de falla que han causado los fracasos anteriores. Sin embargo, es evidente también que las fallas citadas han conducido a la Ingeniería de Pavimentos colombiana a llegar a posiciones conservadoras en el diseño de pavimentos, lo cual se refleja en los términos de referencia de las entidades.

El trabajo de campo ejecutado en el marco de esta investigación tomando cuatro troncales para estudiar las costumbres del tráfico, mostró que la probabilidad de que los buses del sistema apliquen cargas en los bordes de losa es muy remota, y que el factor asociado con la importancia de impedir la infiltración en los bordes también está muy controlado al ejecutar espacio público que confina los pavimentos del sistema y proporcionar mecanismos de subdrenaje en los bordes. Cabe mencionar que los ejercicios de análisis con elementos finitos mostraron que la aplicación de cargas sobre las juntas longitudinales causa esfuerzos y deflexiones, apenas ligeramente superiores, pero muy similares a los de centro de losa con lo cual, teniendo en cuenta que ellas se pisan solo ocasionalmente, esas juntas pueden interpretarse con total efecto de berma, con buena transmisión de cargas.

La observación general de campo adelantada en esta investigación en todas las troncales, mostró que los pavimentos de la Calle 13, la Avenida de las Américas y la Avenida Suba han sido

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

particularmente exitosos en esos aspectos, sin escalonamiento de losas y con muy escaso porcentaje de losas dañadas, considerado normal dentro de los planes de mantenimiento.

Comparados con otras troncales, se evidencia la importancia de comprender que el diseño de un pavimento no solo debe concentrarse en la determinación de espesores, pues subraya la importancia de los detalles: materiales, control de erosión, modulación, transferencia, drenaje y subdrenaje, y de los procesos constructivos: subestructura, curado, transferencia colocación del concreto, aserrado de juntas, sellado, entre otros.

No se observa, en ninguno de los pavimentos visitados, evidencia alguna de fallas con grietas longitudinales paralelas a los bordes, típicas de comportamiento con cargas en borde y tampoco mostró el ejercicio de observación en las troncales que el tránsito de los buses pise los bordes o se acerque a ellos, como quedó evidente en el informe consignado en este documento.

Los análisis de esfuerzos y deformaciones con la técnica de elementos finitos señalaron que la respuesta de las losas entre cargarlas en el borde o en el centro de losa es importante, con diferencias radicales al aplicar los criterios de falla conocidos, de manera que las técnicas conocidas y las hipótesis de Westergaard que dieron origen a las evoluciones de la comprensión mecanicista se pueden comprobar, si bien es evidente que el criterio crítico de falla por erosión aún ofrece incertidumbres.

Los ejercicios de diseño de pavimentos adelantados para esta investigación tomando como ejemplo la Troncal Soacha – Autopista del Sur y el Patio Portal El Vínculo mostraron que, para iguales condiciones mecánicas de infraestructura y de calidad de materiales, dependiendo de la magnitud de las cargas, debido a la consideración entre NO y SI efecto berma, la diferencia de demanda de espesor de losa puede estar entre 4 y 5cm, que representa aproximadamente entre 15 y 20% de consumo adicional de concretos de altas prestaciones, con lo cual resulta de suma importancia la correcta selección de las hipótesis de aplicación de cargas.

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

En conclusión, el efecto berma evidentemente se presenta en todas las troncales construidas y, por tanto, los mecanismos adoptados, como se describió en este documento, para garantizarlo han sido eficientes. Se deduce que las exigencias de las entidades, en el sentido de no considerar berma son factores de seguridad adicionales que implican mayores inversiones que las requeridas. Se ha argumentado que ello conduciría a mayor durabilidad de los pavimentos, lo cual, sin embargo, es discutible. Los análisis de sensibilidad muestran que, en altos tráfico, duplicarlos conduce a uno o máximo dos centímetros adicionales, de manera que con un ligero incremento ya se duplica el periodo de vida teórico. En contraste, aumentar el espesor, implica mayores temperaturas de fraguado, mayor tendencia a la fisuración y esfuerzos residuales de alabeo y mayores problemas de perfil. La discusión, en consecuencia, merece ser llevada más allá. Tal vez sea conveniente profundizar en las investigaciones relacionadas con el efecto de incrementos de espesor y en caso de desearlas, podría recurrirse al enfoque de considerar efectos parciales de berma. Por supuesto, el advenimiento de metodologías diferentes de diseño debe ser algo que se encare de manera decidida si el programa Transmilenio, como es previsible, continúe por muchos años, teniendo en cuenta que el sistema metro solo será eficiente cuando cuente con muchas líneas más que las hasta el momento previstas.

Quedan varias inquietudes, a partir del trabajo adelantado, que pueden ser tomadas como fuente de investigaciones futuras: Entre ellas, cabe mencionar las siguientes:

Los espectros de tránsito para el diseño de los pavimentos rígidos de Transmilenio se suelen construir adoptando las cargas nominales de catálogo, por eje, que proporciona el fabricante, y utilizando una envolvente de cargas considerando las dos marcas que usan las troncales y los patios: Volvo y Mercedes Benz. No se considera la variación de cargas a lo largo del día, con lo cual se ignora que, en las horas pico, pueden existir sobrecargas muy importantes que harían daños mucho más altos que los que pueden compensar las cargas menores de las horas valle. Dado que la ingeniería se trata de modelar los problemas de la manera más próxima posible

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

a la realidad, se sugiere adelantar estudios del nivel de ocupación y el número de cargas en diversos horarios a lo largo de cada jornada, incluyendo aforos y pesajes.

El sistema Transmilenio podría ser el piloto de investigación de adaptación de técnicas modernas de diseño y gestión de pavimentos, basadas en AASHTO 2002-2022 o similares, considerando el ambiente climático de la ciudad, los sistemas constructivos y calidades de materiales de la ciudad.

Tradicionalmente, se ha venido usando correlaciones para determinar el módulo de reacción para el apoyo de las losas a partir del CBR o del módulo supuesto de los materiales. Los últimos proyectos han exigido a los contratistas la medición con placa sobre las subrasantes bogotanas y sobre los materiales de subbase. La generación y estudio de las bases de datos que esos proyectos provean es de suma importancia para estudiar nuevas correlaciones adaptadas a las condiciones físicas de los materiales locales, así como correlaciones de capas de mejoramiento que permitan ajustar ecuaciones derivadas de la elasticidad.

Los pavimentos del sistema Transmilenio, cuyas estructuras, cargas y comportamiento, así como las actividades de mantenimiento han tenido algún seguimiento, pueden ser estudiados en relación con su evolución, de manera sistemática, condensando una base de datos que se pueden obtener en el IDU, de los consultores y constructores, de manera que se pueda concluir acerca de la propiedad de las técnicas de diseño y construcción utilizadas, lo cual conduce a aprendizajes y mejoramientos hacia el futuro.

Aspectos de detalle como las técnicas y materiales de curado, los sellos, la oportunidad de la ventana de aserrado, detalles de modulación, formas de reparación y rehabilitación, así como el uso de refuerzos, fibras, y otros tantos detalles, requieren adaptación de técnicas desarrolladas en otros países al medio.

6. Bibliografía

- Calo, D, H (2012) Diseño y Construcción de Pavimentos de Hormigón. Diseño de Pavimentos Rígidos. Instituto del Cemento Portland Argentino (ICPA).
- Convenio interadministrativo 0587-03 (2006). Manual de Inspección Visual para Pavimentos Rígidos. UNAL. Invías
- Fonseca, A. M. (2002). Ingeniería de Pavimentos para carreteras Tomo I. Colombia: Ediciones y Publicaciones Universidad Católica de Colombia.
- González Sosa, G. P., Vanegas Gómez, E. F., & Torres Ortega, R. D. (2016). Comparación de las metodologías AASHTO y PCA para el diseño de pavimento rígido (Doctoral dissertation, Universidad de Cartagena).
- Higuera, C.S. (2011). Mecánica de pavimentos – Principios básicos. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Historia de TransMilenio. (2013, 21 agosto). TransMilenio. Recuperado de <https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/146028/historia-de-transmilenio/>
- HUANG, Yang. Pavement Analysis and Design. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2004. p. 210.
- Ioannides, A. M., Thompson, M. R., & Barenberg, E. J. (1985). Westergaard solutions reconsidered. Transportation research record, 1043, 13-23.
- León Arenas, H. (2006). Teoría de los pavimentos. Popayán: Universidad del Cauca. (Libro inédito)
- Montejo, A (2002). Ingeniería de pavimentos para carreteras. 2ª edición. Universidad Católica de Colombia.

APLICACIÓN DE EFECTO DE BERMA EN LOSAS DE TRANSMILENIO

- Packard, R. G., & Tayabji, S. D. (1985). New PCA thickness design procedure for concrete highway and street pavements. In Third International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation Purdue University, School of Civil Engineering; Federal Highway Administration; Portland Cement Association; Transportation Research Board; Federal Aviation Administration; and Indiana Department of Highways. (No. 1 Volume).
- Pickett, G., & Ray, G. K. (1951). Influence charts for concrete pavements. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 116(1), 49-73.
- Szasdi, F.J. (2015). Optimización del desempeño de pavimentos rígidos mediante la utilización de soporte lateral. Universidad Rafael Landívar
- Tayabji, S., Ball, C., & Okamoto, P.A. (1984). EFFECT OF CONCRETE SHOULDERS ON CONCRETE PAVEMENT PERFORMANCE.
- Transportation Officials. (1993). AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993 (Vol. 1). Aashto.
- Varela Romero, D. R. (2016). Modelo numérico para la simulación del comportamiento de pavimentos rígidos sometidos al efecto de erosión (Master's thesis, Uniandes).
- Westergaard, H.M. (1926) Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis. Public Roads, 7, 25-35.