



Universidad de Valparaíso
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

ANÁLISIS Y COMPORTAMIENTO DE PAVIMENTOS DE LOSAS CORTAS DE HORMIGÓN APOYADOS SOBRE SUELOS DE BAJA CAPACIDAD DE SOPORTE

Preparado por

SEBASTIÁN MATHIAS TAPIA PÉREZ

**TRABAJO DE TÍTULO PARA OPTAR AL GRADO DE LICENCIADO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA Y AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**PROFESOR GUÍA: GUILLERMO BRANTE LARA
PROFESOR CO-REFERENTE: RICARDO SALSILLI MURÚA**

JUNIO, 2013

Nombre Trabajo de Título: “Análisis y Comportamiento de Pavimentos de Losas Cortas de Hormigón Apoyados sobre Suelos de Baja Capacidad de Soporte”	Revisado por: Ricardo Salsilli Murúa Guillermo Brante Lara
Elaborado por: Sebastián Mathias Tapia Pérez	Fecha: Junio 2013
Identificación Institución: Universidad de Valparaíso	Número de Páginas: 115
RESUMEN	
<p>El presente trabajo de título tiene como propósito, ampliar el conocimiento existente sobre una nueva metodología de diseño de pavimentos de hormigón, conocido como: pavimentos de losas cortas de hormigón. El estudio, estará enfocado en el análisis y comportamiento de pavimentos de losas cortas, apoyadas sobre suelos de baja capacidad de soporte, es decir, subrasantes correspondientes a CBR < 3 %. Además, se evaluará los efectos para dos capas granulares, correspondientes a una subbase granular de CBR=50% y una capa de mejoramiento de CBR=10%, tanto en el rendimiento estructural de un pavimento de hormigón de losas cortas, como en un suelo de subrasante de mala calidad. Para lo último, se estimará una relación entre el espesor de una capa de apoyo y el aumento en el valor del módulo de reacción de la subrasante, K. Para llevar a cabo lo planteado, se requiere un análisis tensional de losas, el cual se realizará a partir de un programa basado en el método de elementos finitos, ISLAB2000. El análisis se efectuará en términos de tensión y deflexión de la losa, y de acuerdo a la teoría de Westergaard, en el que se consideran las configuraciones de carga interior, borde y de esquina.</p> <p>Los resultados indicaron que al disminuir el largo de losa, las tensiones disminuyen, sin embargo las deflexiones que experimenta la losa, aumentan. Por otro lado, el rendimiento estructural de un pavimento de hormigón de losas cortas, no se verá afectado por la presencia de una capa granular, al menos para espesores inferiores a 25 cm, es decir, los niveles de tensiones y deflexiones de la losa, serán muy similares a las de un pavimento sin la consideración del material granular. Mientras que el efecto que tiene una capa granular sobre un suelo de subrasante de baja capacidad de soporte, este estudio llega a la conclusión, de no incluir un aumento en el valor del módulo de reacción de la subrasante, K, cuyos espesores de material granular sean menores a 25 cm.</p>	
<p>Palabras Claves: Pavimentos de hormigón, losas cortas, módulo de reacción subrasante, suelos de fundación, Winkler, análisis tensional, subbases, análisis dimensional, ISLAB2000.</p>	

A MIS PADRES

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer por todo el apoyo y esperanzas puestas en mí, a mi familia. En especial a mis padres, hermana y Laura.

Me gustaría agradecer, a mi asesor de tesis, el Profesor Ricardo Salsilli, por brindarme la oportunidad de realizar el presente estudio, bajo sus conocimientos, ideas y orientación necesaria, para el culmine de mi trabajo de título.

Mis sinceros agradecimientos deben ser expresados, al Instituto del Cemento y Hormigón de Chile, por la prestación y excelente disposición, del software ISLAB2000, herramienta fundamental para el desarrollo del presente estudio.

Agradecer también, a los profesores del directorio de Ingeniería Civil de la Universidad de Valparaíso, por la confianza y aprobación, del progreso y término de este trabajo.

INDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	11
1.1- Objetivos y Alcances	12
1.2- Metodología de la Investigación	13
1.3- Organización del estudio	14
2. REVISIÓN DE LITERATURA Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES EXISTENTES	15
2.1- Módulo de Reacción de la Subrasante, K	15
2.1.1- Determinación y/o Estimación de K	16
2.1.1.1- Ensayo de Placa de Carga	16
2.1.1.2- Correlaciones	18
2.1.1.3- Retroanálisis	22
2.2- Efecto de una Capa granular en el valor de K	25
2.2.1- Análisis de Antecedentes Existentes	32
3. MODELOS DE SUELOS DE FUNDACIÓN	33
3.1- Fundación de Winkler	33
3.2- Fundación Sólido Elástico	34
3.3- Fundación de Pasternak	36
3.4- Fundación de Kerr	37
3.5- Fundación ZSS	37
4. ANÁLISIS TENSIONAL DE LOSAS CORTAS DE HORMIGÓN APOYADOS EN SUELOS DE BAJA CAPACIDAD DE SOPORTE	39
4.1- Introducción	39
4.1.1- Consideraciones para el análisis	39
4.1.1.1- Teoría de Westergaard	39
4.1.1.2- Propiedades de losa de hormigón	40
4.1.1.3- Capas de apoyo	41
4.1.1.4- Suelo de fundación o Subrasante	41
4.1.1.5- Carga aplicada	41
4.2- Condición de Carga Interior	43
4.2.1- Análisis de Tensión	43
4.2.2- Análisis de Deflexión	48
4.2.3- Efecto de una Capa Granular en el Módulo de Reacción de Subrasante K	52
4.2.3.1- Efecto de una capa granular en el valor de K en función del comportamiento tensional	53
4.2.3.2- Efecto de una capa granular en el valor de K en función del comportamiento de deflexión	55
4.3- Condición de Carga de Borde	60
4.3.1- Análisis de Tensión	61
4.3.2- Análisis de Deflexión	65
4.3.3- Efecto de una Capa Granular en el Módulo de Reacción de Subrasante K	69
4.3.3.1- Efecto de una capa granular en el valor de K en función del comportamiento de deflexión	69

4.4- Condición de Carga de Esquina	72
4.4.1- Análisis de Tensión	72
4.4.2- Análisis de Deflexión	77
5- ANÁLISIS DE RESULTADOS	81
5.1- Análisis de Tensión	81
5.1.1- Análisis de Tensión producto una Capa Granular	81
5.2- Análisis de Deflexión	83
5.1.2- Análisis de Deflexión producto una Capa Granular	83
5.3- Análisis del efecto de una Capa Granular en el valor de K	85
6- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	87
7- BIBLIOGRAFÍA	90
ANEXO A	92
ANEXO B	102
ANEXO C	109
ANEXO DIGITAL D	115

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 ESQUEMA DEL DISPOSITIVO PARA LA PRUEBA DE PLACA DE CARGA (U.N.L.P.)	16
FIGURA 2.2 ENSAYO PLACA DE CARGA VISTA GENERAL, CAMIÓN ACTUANDO DE CONTRAPESO.....	17
FIGURA 2.3 ENSAYO DE LA PRUEBA DE PLACA DE CARGA	17
FIGURA 2.4 RELACIÓN APROXIMADA ENTRE LAS CLASIFICACIONES DEL SUELO Y SUS VALORES DE RESISTENCIA (AASHTO).....	20
FIGURA 2.5 CUENCA DE DEFLEXIÓN MÉTODO ÁREA PARA CUATRO SENSORES DE CONFIGURACIÓN, FAA (2011).....	23
FIGURA 2.6 EFECTO DE UNA SUBBASE NO TRATADA EN EL VALOR DE K, MÉTODO PCA, (PACKARD, 1984)....	26
FIGURA 2.7 RELACIÓN ENTRE EL ESPESOR DE UNA BASE/SUBBASE Y EL VALOR DE K COMPUESTO, (UFC, U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2001).....	27
FIGURA 2.8 GRÁFICA PROPUESTA POR KHAZANOVICH (1994), EFECTO BASE ESTABILIZADA EN EL VALOR DE K	28
FIGURA 2.9 GRÁFICA PARA LA DETERMINACIÓN DEL VALOR K COMPUESTO PROPUESTO POR AASHTO 1993	29
FIGURA 2.10 EFECTO SUBBASE DE AGREGADO TRITURADO BIEN GRADUADO EN EL SOPORTE DE LA SUBRASANTE, K. (FAA MÉTODO WESTERGAARD, 2011).....	30
FIGURA 2.11 EFECTO SUBBASE DE ARENA Y GRAVA DE EMPRÉSTITO EN EL SOPORTE DE LA SUBRASANTE, K. (FAA MÉTODO WESTERGAARD, 2011)	30
FIGURA 2.12 EQUIVALENTES VALORES DE K_c POR CONDICIÓN DE UNIÓN DIFERENTE.....	31
FIGURA 2.13 RELACIONES DEL EFECTO DE UNA SUBBASE EN EL VALOR DE K SEGÚN DIFERENTES AUTORES ..	32
FIGURA 3.1 LOSA SOBRE FUNDACIÓN WINKLER, TEORÍA DE WESTERGAARD	33
FIGURA 3.2 LOSA SOBRE FUNDACIÓN SÓLIDO ELÁSTICO	34
FIGURA 3.3 LOSA SOBRE FUNDACIÓN DE PASTERNAK	36
FIGURA 3.4 LOSA SOBRE FUNDACIÓN KERR	37
FIGURA 4.1 CONFIGURACIÓN DE CARGA INTERIOR PARA " L/l "=2 Y " L/l "=5, RESPECTIVAMENTE	43
FIGURA 4.2 DISTRIBUCIÓN DE TENSIÓN PARA CARGA INTERIOR OBTENIDAS CON ISLAB2000 PARA CASOS " L/l "=2 Y " L/l "=5, RESPECTIVAMENTE	43
FIGURA 4.3 COMPORTAMIENTO TENSIONAL PRODUCTO SUBBASE GRANULAR DE CBR=50% PARA " L/l "=2, CARGA INTERIOR.....	46
FIGURA 4.4 COMPORTAMIENTO TENSIONAL PRODUCTO MEJORAMIENTO DE CBR=10% PARA " L/l "=2, CARGA INTERIOR.....	46
FIGURA 4.5 COMPORTAMIENTO TENSIONAL PRODUCTO SUBBASE GRANULAR DE CBR=50% PARA " L/l "=5, CARGA INTERIOR.....	47
FIGURA 4.6 COMPORTAMIENTO TENSIONAL PRODUCTO MEJORAMIENTO DE CBR=10% PARA " L/l "=5, CARGA INTERIOR.....	47
FIGURA 4.7 DISTRIBUCIÓN DE DEFLEXIÓN PARA CARGA INTERIOR OBTENIDAS CON ISLAB2000 PARA CASOS " L/l "=2 Y " L/l "=5, RESPECTIVAMENTE	48
FIGURA 4.8 COMPORTAMIENTO DEFLEXIÓN PRODUCTO SUBBASE GRANULAR DE CBR=50% PARA " L/l "=2, CARGA INTERIOR.....	50
FIGURA 4.9 COMPORTAMIENTO DEFLEXIÓN PRODUCTO MEJORAMIENTO DE CBR=10% PARA " L/l "=2, CARGA INTERIOR.....	50
FIGURA 4.10 COMPORTAMIENTO DEFLEXIÓN PRODUCTO SUBBASE GRANULAR DE CBR=50% PARA " L/l "=5, CARGA INTERIOR.....	51
FIGURA 4.11 COMPORTAMIENTO DEFLEXIÓN PRODUCTO MEJORAMIENTO DE CBR=10% PARA " L/l "=5, CARGA INTERIOR.....	51
FIGURA 4.12 ESQUEMA REPRESENTATIVO PARA LA OBTENCIÓN DEL VALOR DE K COMPUESTO.....	52
FIGURA 4.13 EFECTO DE SUBBASE (CBR=50%) EN EL SOPORTE DE LA SUBRASANTE K, PARA " L/l "=2, CARGA INTERIOR.....	53
FIGURA 4.14 EFECTO DE MEJORAMIENTO (CBR=10%) EN EL SOPORTE DE LA SUBRASANTE K, PARA " L/l "=2, CARGA INTERIOR.....	53
FIGURA 4.15 EFECTO DE SUBBASE (CBR=50%) EN EL SOPORTE DE LA SUBRASANTE K, PARA " L/l "=5, CARGA INTERIOR.....	54

FIGURA 4.16 EFECTO DE MEJORAMIENTO (CBR=10%) EN EL SOPORTE DE LA SUBRASANTE K, PARA “L/l”=5, CARGA INTERIOR.....	54
FIGURA 4.17 EFECTO DE SUBBASE (CBR=50%) EN EL SOPORTE DE LA SUBRASANTE K, PARA “L/l”=2, CARGA INTERIOR.....	55
FIGURA 4.18 EFECTO DE MEJORAMIENTO (CBR=10%) EN EL SOPORTE DE LA SUBRASANTE K, PARA “L/l”=2, CARGA INTERIOR.....	55
FIGURA 4.19 EFECTO DE SUBBASE (CBR=50%) EN EL SOPORTE DE LA SUBRASANTE K, PARA “L/l”=5, CARGA INTERIOR.....	56
FIGURA 4.20 EFECTO DE MEJORAMIENTO (CBR=10%) EN EL SOPORTE DE LA SUBRASANTE K, PARA “L/l”=5, CARGA INTERIOR.....	56
FIGURA 4.21 EFECTO DE SUBBASE (CBR=50%) EN EL SOPORTE DE LA SUBRASANTE K, UTILIZANDO BISAR	58
FIGURA 4.22 EFECTO DE MEJORAMIENTO (CBR=10%) EN EL SOPORTE DE LA SUBRASANTE K, UTILIZANDO BISAR.....	58
FIGURA 4.23 GRÁFICA COMPARATIVA DE VALORES DE KC OBTENIDOS CON ISLAB2000 Y BISAR A PARTIR DE UNA SUBBASE DE CBR=50%.....	59
FIGURA 4.24 GRÁFICA COMPARATIVA DE VALORES DE KC OBTENIDOS CON ISLAB2000 Y BISAR A PARTIR DE UN MEJORAMIENTO DE CBR=10%	59
FIGURA 4.25 CONFIGURACIÓN DE CARGA DE BORDE PARA “L/l”=2 Y “L/l”=5, RESPECTIVAMENTE	60
FIGURA 4.26 DISTRIBUCIÓN DE TENSIÓN PARA CARGA DE BORDE OBTENIDAS CON ISLAB2000 PARA CASOS “L/l”=2 Y “L/l”=5, RESPECTIVAMENTE	61
FIGURA 4.27 COMPORTAMIENTO TENSIONAL PRODUCTO SUBBASE GRANULAR DE CBR=50% PARA “L/l”=2, CARGA BORDE.....	63
FIGURA 4.28 COMPORTAMIENTO TENSIONAL PRODUCTO MEJORAMIENTO DE CBR=10% PARA “L/l”=2, CARGA BORDE.....	63
FIGURA 4.29 COMPORTAMIENTO TENSIONAL PRODUCTO SUBBASE GRANULAR DE CBR=50% PARA “L/l”=5, CARGA BORDE.....	64
FIGURA 4.30 COMPORTAMIENTO TENSIONAL PRODUCTO MEJORAMIENTO DE CBR=10% PARA “L/l”=5, CARGA BORDE.....	64
FIGURA 4.31 DISTRIBUCIÓN DE DEFLEXIÓN PARA CARGA DE BORDE OBTENIDAS CON ISLAB2000 PARA CASOS “L/l”=2 Y “L/l”=5, RESPECTIVAMENTE	65
FIGURA 4.32 COMPORTAMIENTO DEFLEXIÓN PRODUCTO SUBBASE GRANULAR DE CBR=50% PARA “L/l”=2, CARGA BORDE.....	67
FIGURA 4.33 COMPORTAMIENTO DEFLEXIÓN PRODUCTO MEJORAMIENTO DE CBR=10% PARA “L/l”=2, CARGA BORDE.....	67
FIGURA 4.34 COMPORTAMIENTO DEFLEXIÓN PRODUCTO SUBBASE GRANULAR DE CBR=50% PARA “L/l”=5, CARGA BORDE.....	68
FIGURA 4.35 COMPORTAMIENTO DEFLEXIÓN PRODUCTO MEJORAMIENTO DE CBR=10% PARA “L/l”=5, CARGA BORDE.....	68
FIGURA 4.36 EFECTO DE SUBBASE (CBR=50%) EN EL SOPORTE DE LA SUBRASANTE K, PARA “L/l”=2, CARGA BORDE.....	69
FIGURA 4.37 EFECTO DE MEJORAMIENTO (CBR=10%) EN EL SOPORTE DE LA SUBRASANTE K, PARA “L/l”=2, CARGA BORDE.....	70
FIGURA 4.38 EFECTO DE SUBBASE (CBR=50%) EN EL SOPORTE DE LA SUBRASANTE K, PARA “L/l”=5, CARGA BORDE.....	70
FIGURA 4.39 EFECTO DE MEJORAMIENTO (CBR=10%) EN EL SOPORTE DE LA SUBRASANTE K, PARA “L/l”=5, CARGA BORDE.....	71
FIGURA 4.40 CONFIGURACIÓN DE CARGA DE ESQUINA PARA “L/l”=2 Y “L/l”=5, RESPECTIVAMENTE	72
FIGURA 4.41 DISTRIBUCIÓN DE TENSIÓN PARA CARGA DE BORDE OBTENIDAS CON ISLAB2000 PARA CASOS “L/l”=2 Y “L/l”=5, RESPECTIVAMENTE	72
FIGURA 4.42 COMPORTAMIENTO TENSIONAL PRODUCTO SUBBASE GRANULAR DE CBR=50% PARA “L/l”=2, CARGA ESQUINA	75
FIGURA 4.43 COMPORTAMIENTO TENSIONAL PRODUCTO MEJORAMIENTO DE CBR=10% PARA “L/l”=2, CARGA ESQUINA	75

FIGURA 4.44 COMPORTAMIENTO TENSIONAL PRODUCTO SUBBASE GRANULAR DE CBR=50% PARA " L/l "=5, CARGA ESQUINA	76
FIGURA 4.45 COMPORTAMIENTO TENSIONAL PRODUCTO MEJORAMIENTO DE CBR=10% PARA " L/l "=5, CARGA ESQUINA	76
FIGURA 4.46 DISTRIBUCIÓN DE DEFLEXIÓN PARA CARGA DE ESQUINA OBTENIDAS CON ISLAB2000 PARA CASOS " L/l "=2 Y " L/l "=5, RESPECTIVAMENTE	77
FIGURA 4.47 COMPORTAMIENTO DEFLEXIÓN PRODUCTO SUBBASE GRANULAR DE CBR=50% PARA " L/l "=2, CARGA ESQUINA	79
FIGURA 4.48 COMPORTAMIENTO DEFLEXIÓN PRODUCTO MEJORAMIENTO DE CBR=10% PARA " L/l "=2, CARGA ESQUINA	79
FIGURA 4.49 COMPORTAMIENTO DEFLEXIÓN PRODUCTO SUBBASE GRANULAR DE CBR=50% PARA " L/l "=5, CARGA ESQUINA	80
FIGURA 4.50 COMPORTAMIENTO DEFLEXIÓN PRODUCTO MEJORAMIENTO DE CBR=10% PARA " L/l "=5, CARGA ESQUINA	80
FIGURA 5.1 COMPARACIÓN DE RECOMENDACIONES EXISTENTES EN LA OBTENCIÓN DEL Kc VERSUS A LAS ESTIMADAS EN ESTE ESTUDIO	86

INDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 RANGO DE VALORES DE K PARA SUELOS GRANULARES	18
TABLA 2.2 CARACTERIZACIÓN DE SUELOS DE FUNDACIÓN DE UN PAVIMENTO (FAA)	21
TABLA 2.3 CONSTANTES DEL MÉTODO DE AREA PARA LA ECUACIÓN 2.12.....	24
TABLA 2.4 CONSTANTES PARA LA ECUACIÓN 2.14.....	25
TABLA 2.5 CONDICIONES UTILIZADAS PARA EL ANÁLISIS	31
TABLA 4.1 VALORES PARÁMETROS ANALIZADOS	42

1. INTRODUCCIÓN

En un esfuerzo de mejorar la relación costo-beneficio en pavimentos de hormigón, el concepto de pavimentos de losas cortas ha causado un efecto positivo, ya que para dimensiones de losas menores a las tradicionales, es posible la reducción del espesor de losa sin afectar su comportamiento estructural.

La estructura de pavimento de losas cortas consiste básicamente en una capa de hormigón, una capa granular y el suelo de fundación o subrasante. En este sentido, el gran objetivo de la losa de hormigón es resistir las cargas del tránsito y transmitir la menor cantidad de tensiones a las capas siguientes. La capa granular proporciona un soporte estable y uniforme para las losas, mientras que el suelo de subrasante es el soporte natural de la estructura de pavimento, donde es mucho más importante que presente un apoyo estable y uniforme, a que tenga una alta capacidad de soporte.

El suelo de fundación debe ser capaz de soportar las cargas transmitidas desde la estructura de pavimento. Esta capacidad de soporte de carga es, a menudo, afectada por el grado de compactación, contenido de humedad y el tipo de suelo. El comportamiento de un pavimento de hormigón también depende de la uniformidad de la subrasante, sin embargo, un suelo de fundación excelente o bueno es difícil de conseguir, debido a la variabilidad inherente del suelo y las influencias ambientales tales como: el agua y la temperatura.

Dada la eventualidad de encontrarse con suelos de subrasante de baja capacidad de soporte, y con miras de aportar al conocimiento existente sobre pavimentos de losas cortas, este estudio está inspirado en la búsqueda del comportamiento de losas cortas de hormigón apoyado sobre suelos de de baja capacidad de soporte.

El procedimiento general para la investigación, demanda realizar un análisis tensional, en el cual se obtienen los esfuerzos de tensión y deflexión de la losa para una carga inducida. La metodología con la que se efectúa el análisis se realiza según la teoría de Westergaard, la cual idealiza la losa de hormigón como una placa de espesor mediano sobre un líquido denso, es decir, una fundación de Winkler. Además, se consideran las tres condiciones de carga postuladas por Westergaard: condición de carga interior, de borde y esquina.

Para el cálculo de las respuestas de un pavimento de losa corta de hormigón, se utiliza un programa basado en el método de elementos finitos, ISLAB2000, programa diseñado específicamente para el análisis de pavimentos de hormigón.

Por consiguiente, se evaluará el efecto de una capa granular tanto, en la estructura de pavimento de losas cortas de hormigón, como en un suelo de fundación de baja capacidad de soporte. Para esto último, se determinará la relación que existe entre una capa granular y su espesor, y la capacidad de soporte de un suelo subrasante, K , para la obtención de un módulo de reacción compuesto, K_c .

1.1- Objetivos y Alcances

Objetivo General:

- Estudio del comportamiento de pavimentos de losas cortas de hormigón apoyados sobre suelos de fundación de baja capacidad de soporte.

Objetivos Específicos:

- Elaboración de un análisis tensional, a partir de un programa de elementos finitos, ISLAB2000, para la obtención de esfuerzos de tensión y deflexión en losas cortas de hormigón.
- Evaluación del efecto de una subbase granular sobre el rendimiento estructural de un pavimento de losas cortas de hormigón.
- Análisis y comparación entre dos tipos de subbases, correspondiente a un material de CBR=50% y una capa de mejoramiento de CBR=10%, según el efecto que tienen en el rendimiento estructural de un pavimento de losas cortas de hormigón.
- Determinar una relación para la estimación del módulo de reacción compuesto, K_c , que cuantifique la capacidad de soporte que una subbase granular le puede otorgar a un suelo de fundación de mala calidad.
- Análisis y comparación entre dos tipos de subbases, correspondiente a un material de CBR=50% y una capa de mejoramiento de CBR=10%, en la capacidad de soporte entregada a un suelo de fundación de mala calidad.
- Comparar las relaciones del módulo de reacción compuesto, K_c , propias, con las que se encuentran en la literatura, para complementar y/o recomendar una estimación del valor de K_c .

Alcances:

- El suelo de fundación de baja capacidad de soporte corresponde a una subrasante equivalente a un CBR menor o igual a 3%, según lo establecido por el Manual de Carreteras, Vol. 3, 2012.
- El cálculo de las respuestas de un pavimento de hormigón ante las cargas del tránsito, se llevará a cabo mediante el programa de elementos finitos ISLAB2000, software diseñado específicamente para el análisis de pavimentos de hormigón.

1.2- Metodología de la Investigación

Para el desarrollo de este estudio, las etapas en forma cronológicas, se describen a continuación:

- **Revisión de literatura.** Para una integración acorde al estudio, fue necesario una ardua revisión de la literatura existente, abarcando un amplio espectro de los temas a tratar en este trabajo, el cual se centra principalmente en: pavimentos de hormigón, losas cortas de hormigón, modelos de suelos de fundación, módulo de reacción de la subrasante K, donde se incluye, concepto y métodos de determinación, efecto de una subbase en el valor de K, teoría de Westergaard, teoría de multicapas o método Shell, y además de la comprensión y dominio del programa de elementos finitos ISLAB2000, facilitado por el Instituto del Cemento y Hormigón de Chile (ICH).
- **Recopilación de antecedentes.** Junto con la revisión de literatura, fue necesario recopilar información para el análisis de antecedentes existentes y para revelar las investigaciones que ya se han realizado.
- **Análisis Tensional.** Para el efecto del análisis tensional, primero se investigó sobre los parámetros que estaban involucrados en dicho análisis, es decir, se buscaron los rangos de valores que normalmente se utilizan y/o poseen las variables a intervenir. Segundo, ya asumida la comprensión y dominio de ISLAB2000, se realizó el cálculo de los esfuerzos provocados en una losa de hormigón impuestos por una carga vehicular tipo rueda simple. Con estos esfuerzos se logró realizar un análisis en términos de tensión y deflexión de la losa mediante la utilización de Excel.
- **Determinación del efecto de una subbase en el valor de K.** Una vez finalizado el análisis tensional, se procede a encontrar una relación de soporte entre una subbase granular y un suelo de fundación. Para ello, se utilizan las deflexiones obtenidas en el análisis tensional, y mediante ISLAB2000, se realiza el ejercicio de hacer coincidir las deflexiones de un pavimento de dos capas con un sistema de una capa (losa – subrasante), logrando determinar los valores de K_c , para distintos espesores de subbase granular. Análogamente, se determina K_c , según la teoría de multicapas, utilizando el programa BISAR, diseñado por la Shell.
- **Análisis de resultados.** Con la amplia gama de resultados entregados por el análisis de tensión, se exponen los acontecimientos más significativos que resultaron de este estudio, la cual finaliza con las conclusiones finales del estudio.

1.3- Organización del estudio

- Capítulo 1. “Introducción”: Se presenta una breve descripción de pavimentos de losas cortas de hormigón y el motivo por el cual surge este estudio. Además, se señala la forma y metodología para el desarrollo del estudio, con sus objetivos y alcances.
- Capítulo 2. “Revisión de literatura y análisis de antecedentes existentes”: Este capítulo proporciona una revisión bibliográfica de los parámetros involucrados en la temática de este estudio. Al mismo tiempo, cuenta con un análisis y comparación de las recomendaciones realizadas por diferentes autores, para la estimación del valor del módulo de reacción compuesto, K_c .
- Capítulo 3. “Modelos de suelos de fundación”: En este acápite se exponen las diferentes maneras y los distintos tipos que existen, para la modelación de un suelo de fundación o subrasante, junto con una completa descripción y, dando a conocer sus ventajas y limitaciones. Finalmente, se expresa la elección del modelo de subrasante a utilizar en este trabajo.
- Capítulo 4. “Análisis tensional de losas cortas de hormigón apoyados en suelo de fundación de baja capacidad de soporte”: Primero, se realiza la descripción y forma funcional del análisis que se llevará a cabo. Luego, se presentan los resultados obtenidos para las distintas condiciones de cargas consideradas, con sus respectivos comentarios, según lo expuesto.
- Capítulo 5. “Análisis de resultados”: Se señalan los acontecimientos más relevantes que provienen del análisis del capítulo anterior, distinguiendo entre el análisis de tensiones, deflexiones y efecto de una capa granular.
- Capítulo 6. “Conclusiones y recomendaciones”: Descripción general de lo realizado por este estudio, junto con las respuestas de los objetivos planteados. Además, se expresan las recomendaciones y/o reconsideraciones que este estudio reveló.
- Capítulo 7. “Bibliografía”: Se exponen los autores y publicaciones, en las cuales se apoyó el trabajo de título.
- ANEXO A: Se entregan los resultados obtenidos de tensión, deflexión y módulo de reacción compuesto, obtenidos con ISLAB2000 y Westergaard, a partir de la condición de carga interior.
- ANEXO B: Proporciona los resultados obtenidos de tensión, deflexión y módulo de reacción compuesto, obtenidos con ISLAB2000 y Westergaard, a partir de la condición de carga de borde.
- ANEXO C: Contiene los resultados obtenidos de tensión y deflexión, obtenidos con ISLAB2000 y Westergaard, a partir de la condición de carga de esquina.
- ANEXO DIGITAL D: Incorpora los documentos entregados por el programa ISLAB2000, para cada uno de los casos analizados.

2. REVISIÓN DE LITERATURA Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES EXISTENTES

Este capítulo proporciona una visión general de las investigaciones previas relacionadas con la temática de este estudio. El capítulo consta de dos partes. La primera parte presenta una revisión bibliográfica del módulo de reacción de la subrasante, K , y, los métodos para su determinación y estimación. La segunda parte se enfoca en el efecto que tiene la presencia de una subbase granular en el valor de K , es decir, el valor del módulo de reacción compuesto del sistema subrasante – subbase.

2.1- Módulo de Reacción de la Subrasante, K

Se define como la constante de proporcionalidad entre la presión aplicada y la deflexión de la placa de carga y es el parámetro que representa la rigidez de los resortes de una fundación de Winkler.

El módulo de reacción de la subrasante, también conocido como el coeficiente de balasto, es el parámetro para identificar la capacidad de soporte del suelo de fundación. Idealmente se determina por ensayos de placa de carga, según los procedimientos establecidos en AASHTO T222 (AASHTO, 1981). En aquellos casos en que el ensayo de placa de carga no puede ser llevado a cabo, existen otras formas de estimar el valor K , ya sea a través de correlaciones o bien, por retroanálisis (esto es sólo para pavimentos existentes), los que se detallarán más adelante.

Cabe señalar que el valor K no es una propiedad intrínseca del suelo, es decir, no tiene un valor único para un suelo en particular, ya que depende de varias propiedades del material ya sea, compactación, humedad y el tipo de suelo. En el caso de K obtenido con el ensayo de placa de carga, el valor, además depende, tanto de las propiedades de la placa, como las de la carga. Por ello, es de gran importancia una buena estimación del valor de K , debido a que este parámetro representa las características de apoyo en el análisis y/o diseño de losas de hormigón. Además, la Administración Federal de Aviación (FAA, 2009) de los Estados Unidos asume que los errores en la selección del valor de K pueden generar cambios notables en los espesores requeridos de un pavimento.

En la última publicación del Manual de Carreteras (2012) se menciona la denominación de “efectivo” al módulo de reacción de la subrasante, para indicar que se está utilizando un valor medio compensado que toma en consideración las eventuales variaciones estacionales que, en ciertas circunstancias, experimenta este parámetro a lo largo del año. En todo caso, se recomienda incluir esta consideración sólo cuando se prevea una penetración de la helada importante en suelos heladizos. Por otra parte, el método de PCA (Portland Cement Association) no tiene en cuenta la variación de los valores de K a lo largo del año. El argumento consiste en que el soporte de la subrasante reducido, durante períodos de deshielo, tiene un efecto muy pequeño o nulo en el espesor requerido de pavimentos de hormigón, tal como lo demuestran los resultados de la prueba AASHTO. Esto es así, porque los breves períodos en que los valores de K son bajos, durante el deshielo, éstos son más compensados por los mayores períodos de congelamiento cuando los valores de K son mucho más altos que el valor de diseño (Huang, 2003).

Por otro lado, la AASHTO sugiere un valor de K dinámico efectivo que representa la compresibilidad de todas las capas debajo de la losa de hormigón y se calcula para cada mes del año, donde el valor de K diseño resulta del promedio mensual de dicho valor (AASHTO, 2004)

Como se ha descrito, el módulo de reacción de la subrasante cumple un rol fundamental para el diseño de pavimento de hormigón y aún más, cuando son de losas cortas, ya que con un tamaño reducido de espesor de losa, las deflexiones del pavimento aumentan significativamente, requiriendo abordar con especial atención las especificaciones de las capas de soporte.

2.1.1- Determinación y/o Estimación de K

Existen 3 métodos para estimar el valor de K de la subrasante, para un proyecto de diseño de pavimento, las cuales son:

- Ensayo de placa de carga
- Correlaciones
- Retroanálisis de mediciones de deflectometría de impacto

2.1.1.1- Ensayo de Placa de Carga

Existen dos tipos de ensayos de placa de carga: ensayos con cargas estáticas repetitivas (AASHTO T221) y ensayos con cargas estáticas no repetitivas (AASHTO T222). El valor de K que se requiere para el diseño de un pavimento de hormigón se puede determinar con cualquiera de los dos ensayos indicados. En el ensayo de carga repetitiva, el valor K se determina como la razón entre la carga y la deformación elástica (la parte que se recupera de la deformación total), en cambio para el ensayo de carga no repetitiva, se define como la razón entre la carga y deformación para una deformación de 1,25 mm (0,05"). En ambos ensayos se realiza con un plato o placa de 762 mm (30") y el uso de una placa de menor diámetro dará lugar a un valor de K mayor (FAA, 2009).

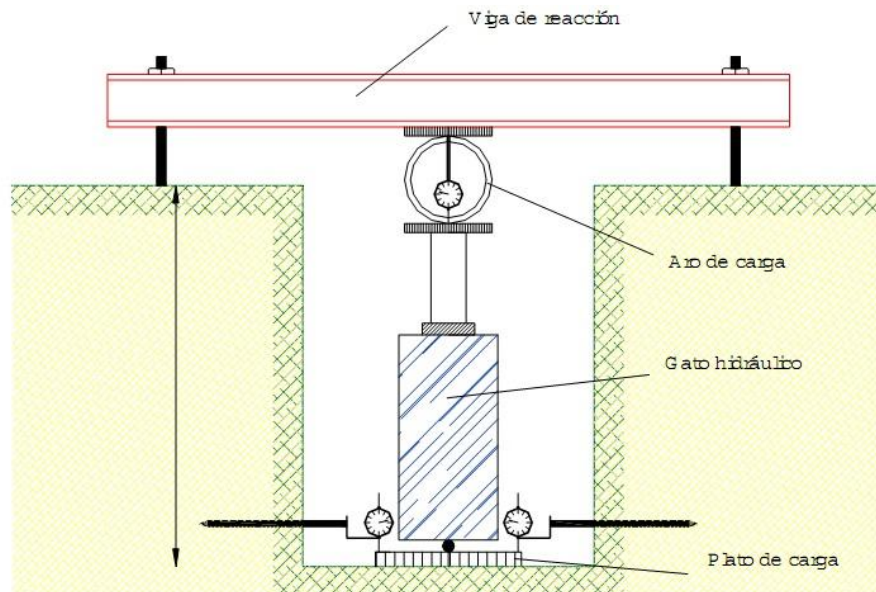


Figura 2.1 Esquema del dispositivo para la prueba de placa de carga (U.N.L.P.)



Figura 2.2 Ensayo placa de carga vista general, camión actuando de contrapeso



Figura 2.3 Ensayo de la prueba de placa de carga

2.1.1.2- Correlaciones

Este método permite estimar el valor de K cuando se conocen otros factores implicados en la evaluación de los materiales de subrasante. Comúnmente el módulo de elasticidad (E), CBR e incluso características granulométricas y clasificación del tipo de suelo se utilizan en la caracterización rigidez/resistencia de un suelo de fundación.

Existe una variedad de relaciones que involucran al coeficiente de balasto (K) con CBR y/o el módulo de elasticidad (E) cuyo resumen se muestra a continuación:

2.1.1.2.1- Correlaciones según Manual de Carreteras (Vol. 3, MOP, 2012)

La siguiente relación permite estimar el valor de K cuando se conoce el CBR.

$$k = 69,78 * \log CBR - 10,16$$

ec 2.1

Donde,

K = Módulo de reacción de la subrasante, [MPa/m]

CBR = Razón de soporte de California, [%]

Tabla 2.1 Rango de valores de K para suelos granulares

CLASIFICACION AASHTO	DESCRIPCION	U.S.C. S	DENSIDAD SECA (kg/m ³)	CBR (%)	k (MPa/m)
suelos gruesos					
A-1-a, bien graduado	Grava	GW, GP	2.000-2.250	60 – 80	80 - 120
A-1-a, mal graduado			1.900-2.100	35 – 60	80 – 110
A-1-b	Arena gruesa	SW	1.750-2.100	20 – 40	55 – 110
A-3	Arena fina	SP	1.680- 1.900	15 – 25	40 – 80
Suelos A-2 (granulares con muchos finos)					
A-2-4, grava	Grava limosa	GM	1.100-2.300	40 – 80	80 – 135
A-2-5, grava	Grava limo arenosa				
A-2-4, arenosa	Arena limosa	SM	1.900-2.150	20 – 40	80 – 110
A-2-5, arenosa	Grava areno limosa				
A-2-6,grava	Grava arcillosa	GC	1.900-2.250	20 – 40	55 – 120
A-2-7, grava	Grava areno arcilla				
A-2-6, arenoso	Arena arcillosa	SC	1.680-2.100	10 – 20	40 – 95
A-2-7, arenoso	Arena gravo arcillosa				

Fuente: Manual de Carreteras Volumen 3, 2012

2.1.1.2.2- Correlaciones según Laboratorio Nacional de Vialidad

La siguiente relación empírica, para determinar K en función de CBR, no necesita aplicar ninguna corrección, salvo cuando hay presencia de un estrato rígido.

$$k = 2,55 + 52,5 * \log(CBR) \quad \text{si } CBR < 10 \quad \text{ec 2.2}$$

$$k = 46 + 9,08 * [\log(CBR)]^{4,34} \quad \text{si } CBR \geq 10 \quad \text{ec 2.3}$$

$$k_d = k * e^{0,76 \cdot (3-z) \cdot k^{-0,294}} \quad \text{ec 2.4}$$

Donde,

K = Módulo de reacción de la subrasante, [MPa/m]

CBR = Razón de soporte de California, [%]

K_d = Módulo de reacción de la subrasante corregido por presencia de estrato rígido, [MPa/m]

z = Profundidad a la que se encuentra el estrato rígido, menor a 3 m, [m]

2.1.1.2.3- Correlaciones según AASHTO 93

Las siguientes relaciones permiten determinar K cuando se conoce el módulo resiliente y CBR de la subrasante.

$$k = \frac{M_R}{19,4} \quad \text{ec 2.5}$$

$$k = \frac{1500 \cdot CBR}{19,4} \quad \text{ec 2.6}$$

Donde,

K = Módulo de reacción de la subrasante, [psi/in]

M_R = Módulo resiliente de la subrasante, [psi]

CBR = Razón de soporte de California, [%]

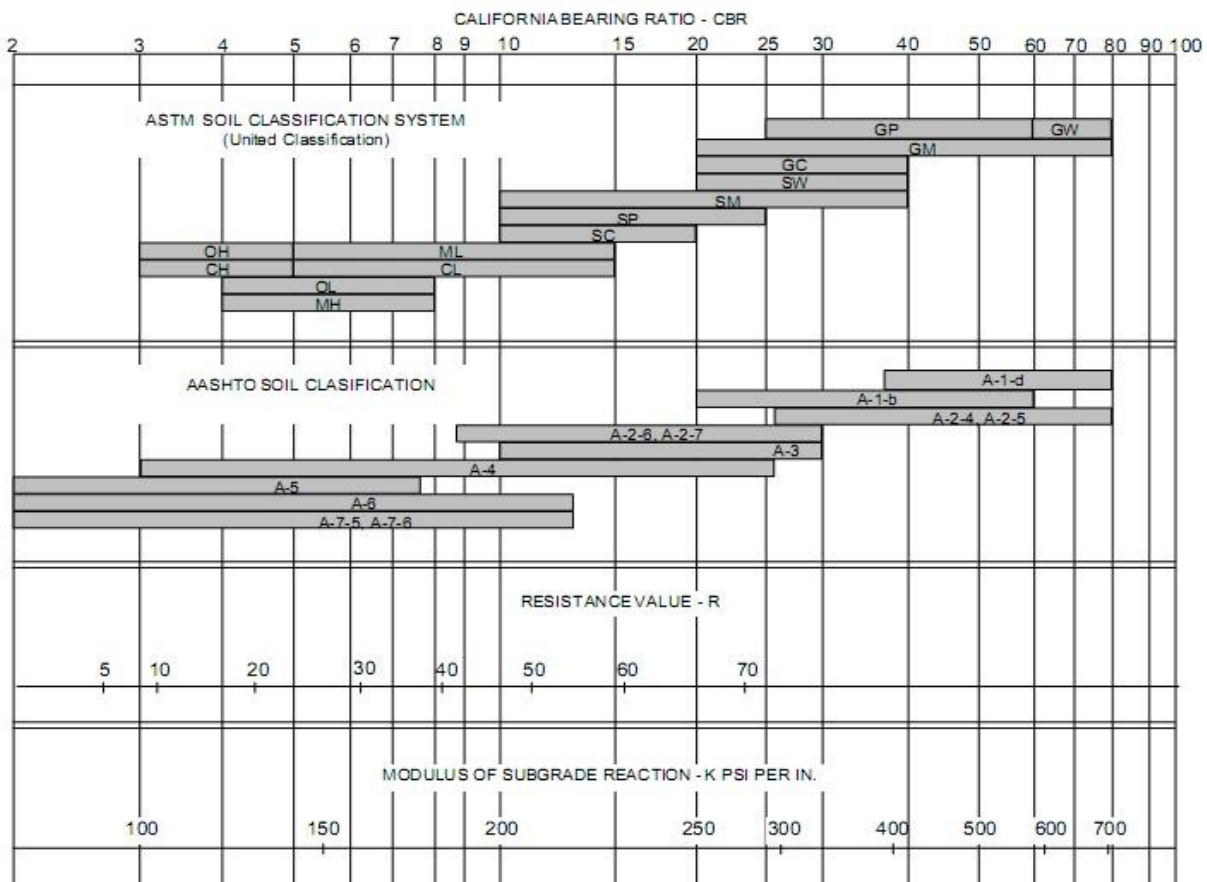


Figura 2.4 Relación aproximada entre las clasificaciones del suelo y sus valores de resistencia (AASHTO)

2.1.1.2.4- Correlaciones según Administración Federal de Aviación (FAA)

La conversión de CBR a valor de K para la subrasante se puede lograr utilizando la siguiente expresión:

$$k = \left[\frac{1500 * CBR}{26} \right]^{0,7788} \quad \text{ec 2.7}$$

Donde,

K = Módulo de reacción de la subrasante, [psi/in]

CBR = Razón de soporte de california, [%]

Tabla 2.2 Caracterización de suelos de fundación de un pavimento (FAA)

Principales divisiones		Letra	Descripción	Peso específico seco (pcf)	CBR %	K (pci)
(1)	(2)	(3)	(4)	(10)	(11)	(12)
Suelos de grava gruesa	Grava Y Suelo gravoso	GW	Grava o arena gravosa bien graduada	125-140	60-80	300 o más
		GP	Grava o arena gravosa mal graduada	120-130	35-60	300 o más
		GU	Grava o arena gravosa uniformemente graduada	115-125	25-50	300 o más
		GM	Grava limosa o grava limosa arenosa	130-145	40-80	300 o más
		GC	Grava arcillosa o grava arcillosa arenosa	120-140	20-40	200-300
	Arena y suelos arenosos	SW	Arena o arena gravosa, bien graduada	110-130	20-40	200-300
		SP	Arena o arena gravosa, mal graduada	105-120	15-25	200-300
		SU	Arena o arena gravosa, pobre uniformidad	100-115	10-20	200-300
		SM	Arena limosa o grava arena limosa	120-135	20-40	200-300
		SC	Arena arcillosa o grava arena arcillosa	105-130	10-20	200-300
Suelos de grano fino	Baja compresibilidad LL<50	ML	Limo, limo arenoso	100-125	5-15	100-200
		CL	Arcilla pobre, arcilla arenosa	100-125	5-15	100-200
		OL	Limo orgánico o arcilla pobre orgánico	90-105	4-8	100-200
	Alta compresibilidad LL<50	MH	Arcilla micácea o suelos de diatomeas	80-100	4-8	100-200
		CH	Arcilla de gran plasticidad	90-110	3-5	50-100
		OH	Arcilla orgánica, limo orgánico	80-105	3-5	50-100

Fuente: FAA: AC 150/5320-6E

2.1.1.3- Retroanálisis

Esta técnica consiste en utilizar datos de deflexión de pavimentos de hormigón obtenidos a través de ensayos no destructivos (NDT). En la mayoría de los casos, los datos pueden ser utilizados para evaluar la condición estructural o funcional de un pavimento (FAA, 2011). Un equipo de NDT es el Deflectómetro de Impacto (FWD) que mide la deflexión en las capas del pavimento después de la aplicación de una carga dinámica.

Una de las técnicas de retroanálisis, e incluida en la Guía AASHTO, es el método AREA, propuesto por primera vez por Hoffman y Thompson (Hoffman & Thompson, 1981) para la interpretación de las cuencas de deflexión en pavimentos de asfalto. Posteriormente, Ioannides (Ioannides A. , 1989) aplicó el concepto de AREA al retrocálculo de módulos elásticos y valores de K en pavimentos de hormigón, identificando la relación única entre AREA y el radio de rigidez relativa.

El método AREA se basa en la solución de Westergaard para la condición de carga interior, el cual consiste en una placa apoyada en un material elástico lineal, homogéneo e isotrópico que descansa sobre una base líquido denso, es decir, una fundación de Winkler (L. Khazanovich, 1998). El término AREA hace referencia a una cuenca de deflexión producido por las deflexiones que se miden a diferentes distancias radiales desde el centro de la carga aplicada. La solución presentada está basada en el hecho de que, para un radio de carga dado y una posición determinada de los sensores, existe una única relación entre AREA y el radio de rigidez relativa en el sistema del pavimento, con el cual, AREA estima el radio de rigidez relativa en función de la superficie de la cuenca de deflexión, para luego determinar el módulo de reacción de la subrasante, K.

A continuación, se muestran los pasos necesarios para calcular el módulo de reacción de la subrasante K, a partir del método AREA presentado por la FAA (2011). Las ecuaciones 2.8 y 2.9 se utilizan para losas de hormigón de espesores menores a 400 mm, y las ecuaciones 2.10 y 2.11 para espesor de losa mayor a 400 mm.

$$AREA_{4\text{ Sensor}} = \left[6 + 12 \left(\frac{d_{12}}{d_0} \right) + 12 \left(\frac{d_{24}}{d_0} \right) + 6 \left(\frac{d_{36}}{d_0} \right) \right] \quad ec\ 2.8$$

$$AREA_{7\text{ Sensor}} = \left[4 + 6 \left(\frac{d_8}{d_0} \right) + 5 \left(\frac{d_{12}}{d_0} \right) + 6 \left(\frac{d_{18}}{d_0} \right) + 9 \left(\frac{d_{24}}{d_0} \right) + 18 \left(\frac{d_{36}}{d_0} \right) + 12 \left(\frac{d_{60}}{d_0} \right) \right] \quad ec\ 2.9$$

$$AREA_{5\text{ Sensor}} = \left[3 + 6 \left(\frac{d_{18}}{d_{12}} \right) + 9 \left(\frac{d_{24}}{d_{12}} \right) + 18 \left(\frac{d_{36}}{d_{12}} \right) + 12 \left(\frac{d_{60}}{d_{12}} \right) \right] \quad ec\ 2.10$$

$$AREA_{6\text{ Sensor}} = \left[6 + 12 \left(\frac{d_{24}}{d_{12}} \right) + 12 \left(\frac{d_{36}}{d_{12}} \right) + 12 \left(\frac{d_{48}}{d_{12}} \right) + 12 \left(\frac{d_{60}}{d_{12}} \right) + 6 \left(\frac{d_{72}}{d_{12}} \right) \right] \quad ec\ 2.11$$

Donde,

AREA = AREA del cuenco de deflexiones para los casos de 4, 5, 6 y 7 sensores, [pulg]

d_0 = La deflexión máxima en el centro de la placa de carga, [mili pulg]

d_i = Deflexiones a 0, 8, 12, 18, 24, 36, 48, 60 y 72 pulgadas desde el centro de la placa de carga, [mili pulg]

En la Figura 2.4 se ilustra el método AREA para cuatro sensores de configuración.

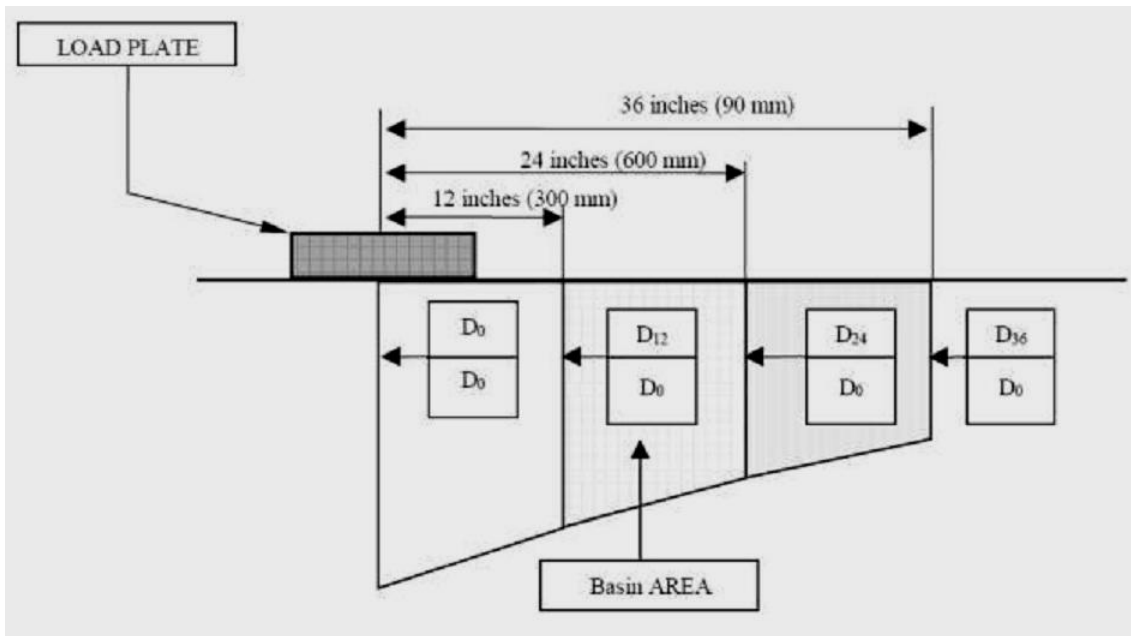


Figura 2.5 Cuenca de deflexión método AREA para cuatro sensores de configuración, FAA (2011)

El siguiente paso es calcular el radio de rigidez relativa que viene dada por la siguiente relación:

$$l = \left[\frac{\ln \left(\frac{A - AREA}{B} \right)}{C} \right]^D \quad \text{ec 2.12}$$

Donde,

l = Radio de rigidez relativa de una fundación Winkler, [pulg]

AREA = AREA calculado de las ecuaciones 3 y 4, [pulg]

A, B, C, D = Constantes de AREA, como se muestran en la tabla 2.3

Tabla 2.3 Constantes del método de AREA para la ecuación 2.12

Método AREA	Constantes			
	A	B	C	D
4 sensores (0 a 36 in (0 a 90 cm))	36	1812,279	-2,559	4,387
7 sensores (0 a 60 in (0 a 150 cm))	60	289,078	-0,698	2,566
5 sensores (12 a 60 in (30 a 150 cm))	48	158,408	-0,476	2,22
6 sensores (12 a 72 in (30 a 180 cm))	60	301,8	-0,622	2,501

Fuente: FAA: AC 150/5370-11B

Una vez obtenido el radio de rigidez relativa se procede a calcular el módulo de reacción de la subrasante a partir de la ecuación:

$$k = \left(\frac{Pd_r^*}{d_r l^2} \right) \quad \text{ec 2.13}$$

Donde,

k = Módulo de reacción de la subrasante, [psi/pulg]

P = Carga aplicada de NDT, [lb]

l = Radio de rigidez relativa de una fundación Winkler, [pulg]

d_r^* = Coeficiente adimensional de deflexión de distancia radial r

d_r = Deflexión medida en distancia radial r, [pulg]

El coeficiente de deflexión adimensional d_r^* , se puede calcular como sigue:

$$d_r^* = x e^{(-y e^{(-z l)})} \quad \text{ec 2.14}$$

Donde,

d_r^* = Coeficiente adimensional de deflexión de distancia radial r

l = Radio de rigidez relativa de una fundación Winkler, [pulg]

x, y, z = Constante como se muestra en la tabla 2.4

Tabla 2.4 Constantes para la ecuación 2.14

Dist. radial desde Plato de Carga, pulg (cm)	Constantes		
	X	Y	Z
0	0,12450	0,14707	0,07565
8 (20)	0,12323	0,46911	0,07209
12 (30)	0,12188	0,79432	0,04074
18 (46)	0,11933	1,38363	0,06909
24 (61)	0,11634	2,06115	0,06775
36 (91)	0,10960	3,621872	0,06568
60 (152)	0,09521	7,41241	0,06255

Fuente: FAA: AC 150/5370-11B

2.2- Efecto de una Capa granular en el valor de K

Los pavimentos de hormigón son, generalmente, analizados sin considerar la contribución proporcionada por las capas de base o subbase. Sin embargo, se sabe que estas capas subyacentes pueden tener un efecto sobre el rendimiento estructural del pavimento, en particular si la unión entre la losa y la subbase se produce. Si tal unión se efectúa, la estructura de pavimento eficaz es, ahora, mayor, y la manera en que el pavimento reacciona a las carga del tránsito, se altera (L. Khazanovich, 1998).

La necesidad de una base o subbase está impulsada por el tránsito y los niveles de carga (Jung, Zollinger, Won, & Wimsatt, 2009), cuyo propósito es proporcionar un soporte estable y uniforme para las losas de hormigón. Por consecuencia, cuando una subbase se utiliza, habrá un aumento en el valor de K, que debe ser considerado en el diseño (Huang, 2003).

Los métodos de diseño presuponen que los módulos de las capas son crecientes desde la subrasante hacia la superficie, de manera que siempre debe estructurarse considerando esta condición. Los análisis, tanto teóricos, como prácticos, demuestran que el módulo de una capa no es independiente del módulo de la capa subyacente, de manera que él, no solo depende de las propiedades del material que conforma la capa, existiendo otros factores que intervienen en los módulos. Estos son: el módulo del suelo subyacente, las propiedades del suelo que conforma la capa, el espesor y el grado de confinamiento. Como consecuencia de esta condición, en la estructuración de pavimentos, no deben colocarse, en forma sucesiva, capas de suelos con módulos muy diferentes, pues el comportamiento de una capa con módulo alto no será el que estrictamente le corresponde, si ella se apoya sobre un suelo con módulo muy inferior. Tal como pasaría al emplazar una subbase, de alto módulo, sobre un suelo de fundación de baja capacidad de soporte (método Shell).

La compresibilidad de las capas por debajo de la losa de hormigón se denomina, Módulo de Reacción Compuesto (Kc), el cual representa el efecto en soporte de una capa granular, al suelo de fundación. Por tanto, el valor de Kc es un valor estimado, no una entrada directa para el procedimiento de diseño (Khazanovich, Yu, Rao, & Selezneva, 2002). Otros autores denominan este parámetro como K efectivo o K sobre subbase. En este estudio se identificará como K compuesto, Kc.

A continuación se presentan relaciones, existentes en la bibliografía, entre el espesor de una base o subbase y el valor de Kc para sistemas de pavimentos de hormigón.

El método de la PCA (Asociación de Cemento Portland de E.E.U.U) presenta una gráfica con el aumento aproximado en los valores de K_c , a partir de la presencia de una subbase granular no adherida (Packard, 1984).

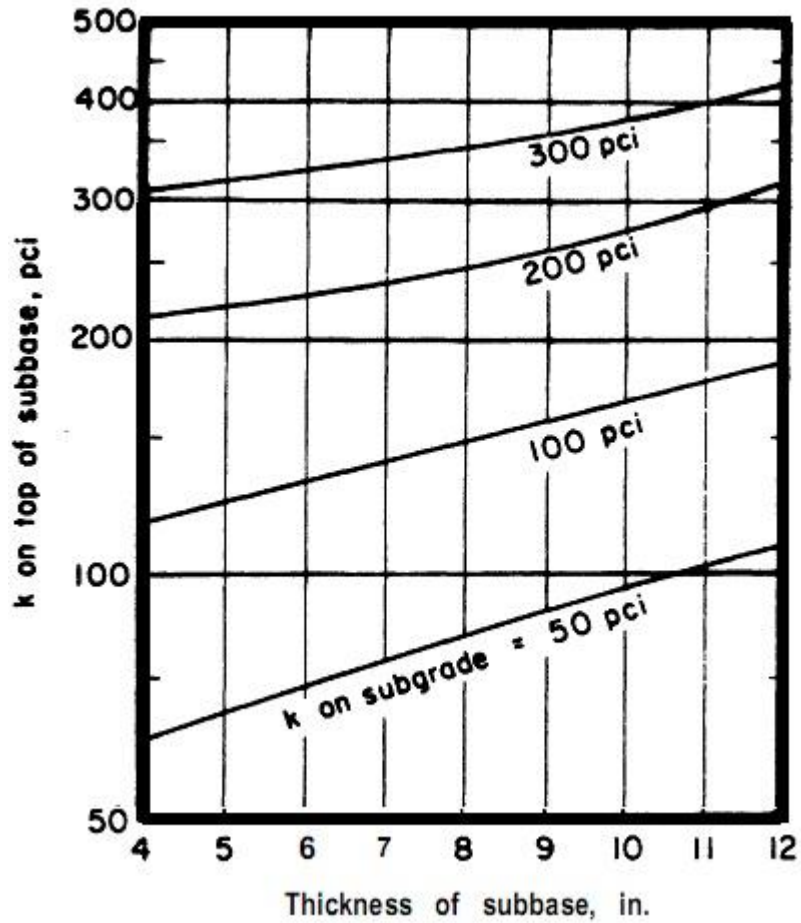


Figura 2.6 Efecto de una subbase no tratada en el valor de K_c , método PCA, (Packard, 1984)

El Departamento de Defensa de EE.UU, a través del programa Unificado de Instalaciones de Criterios (UFC, U.S. Army Corps of Engineers, 2001) y en su publicación, Evaluación de Pavimentos de Aeropuertos, recomienda la siguiente relación entre el espesor de una base o subbase y el valor de K compuesto.

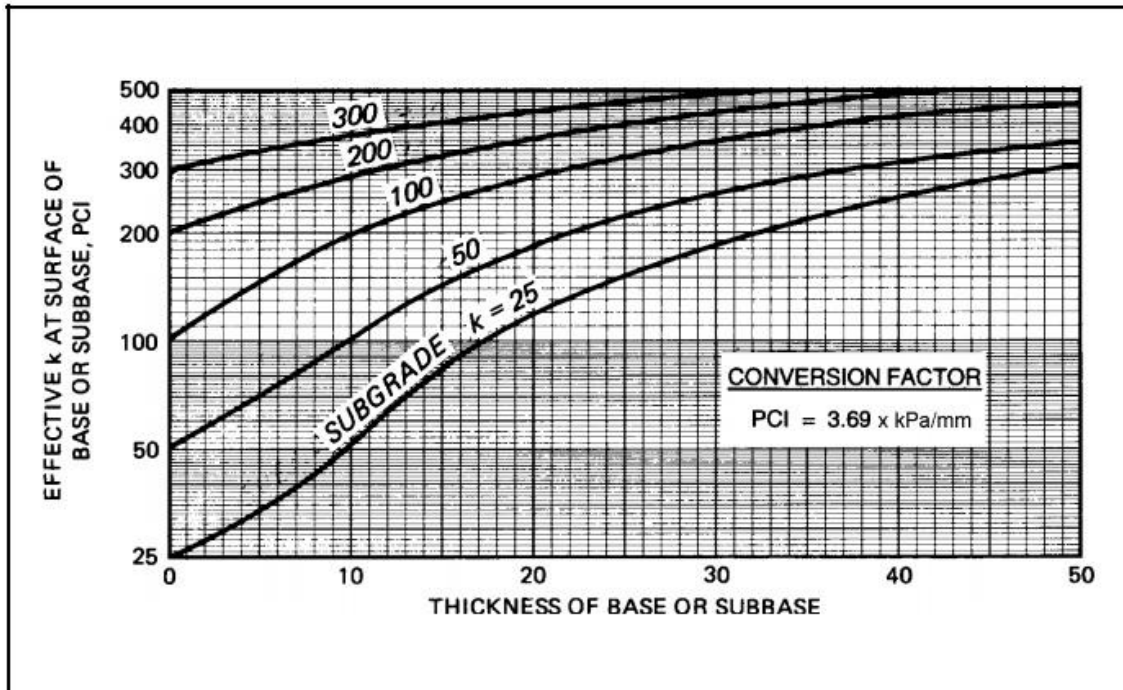


Figura 2.7 Relación entre el espesor de una base/subbase y el valor de K compuesto, (UFC, U.S. Army Corps of Engineers, 2001)

Lev Khazanovich (Khazanovich L. , 1994) sugiere una reconsideración del gráfico propuesto por la FAA (Diseño y Evaluación de Pavimentos Aeroportuarios, 1978), realizando una comparación de las curvas del efecto de una subbase en el valor de K. El sistema considerado por Khazanovich (1994) consta de losa de hormigón de 10 pulgadas de espesor, con módulo de elasticidad de 4 Mpsi y relación de Poisson 0,15, que descansa sobre una base estabilizada, no adherida, de módulo de elasticidad de 100.000 psi con una relación de Poisson de 0,25, sobre una fundación Winkler con un valor K de 50 psi/in. El radio del área de carga aplicada, se fijó en 5,9 pulg con una presión de neumático igual a 100 psi. Se obtuvieron curvas según el comportamiento de tensión y deflexión máxima utilizando, el programa DIPLOMAT. Los espesores de la base van desde las 4 hasta las 16 pulgadas.

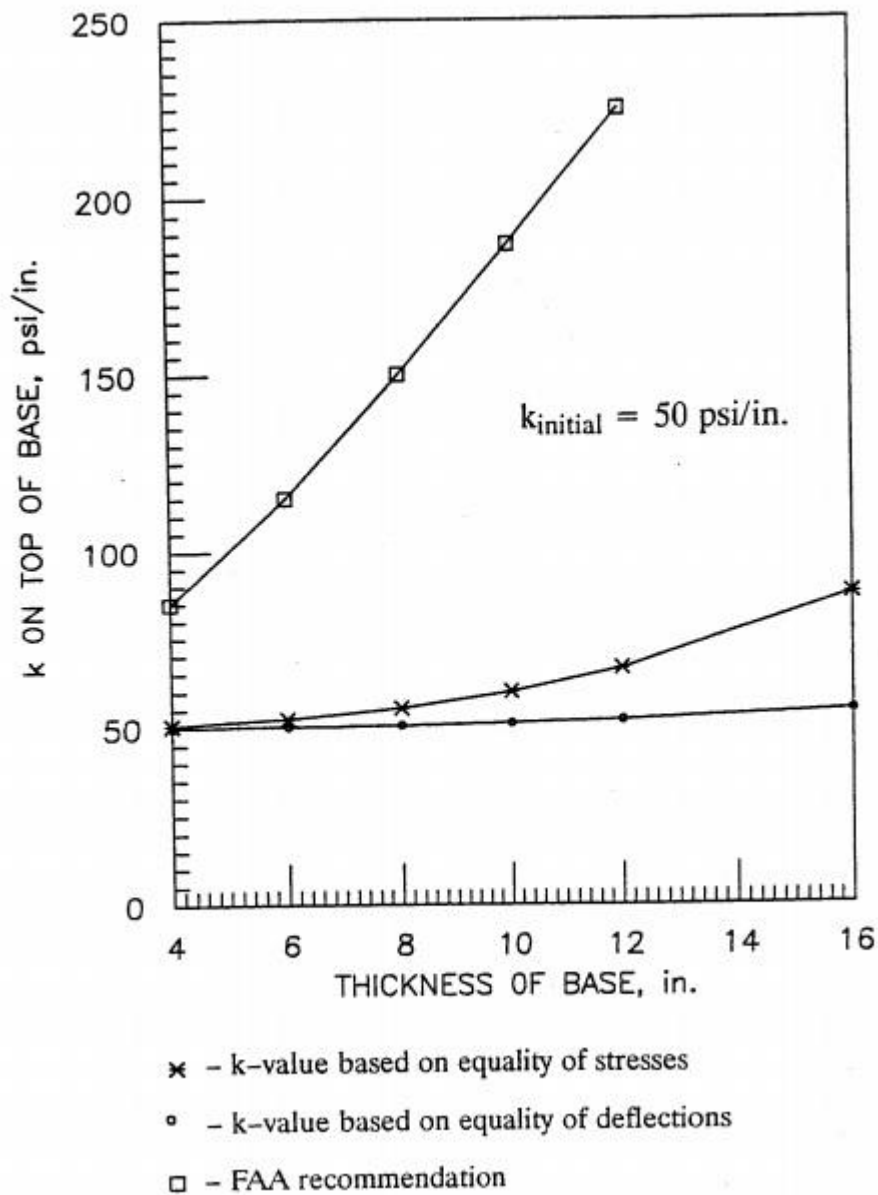


Figura 2.8 Gráfica propuesta por Khazanovich (1994), efecto base estabilizada en el valor de K

En 1993 AASHTO en su guía para el diseño de estructuras de pavimentos (AASHTO), recomienda un ábaco en respuesta al valor compuesto de K. Entre los factores que participan para la determinación del valor se encuentran: el espesor y módulo de elasticidad de subbase y el módulo elástico (resiliente) de la subrasante. El gráfico para estimar módulo compuesto de balasto, K_c , supone una profundidad subrasante semi-infinito. (Para los propósitos prácticos, una profundidad semi-infinito se considera que es mayor que 10 pies por debajo de la superficie de la subrasante).

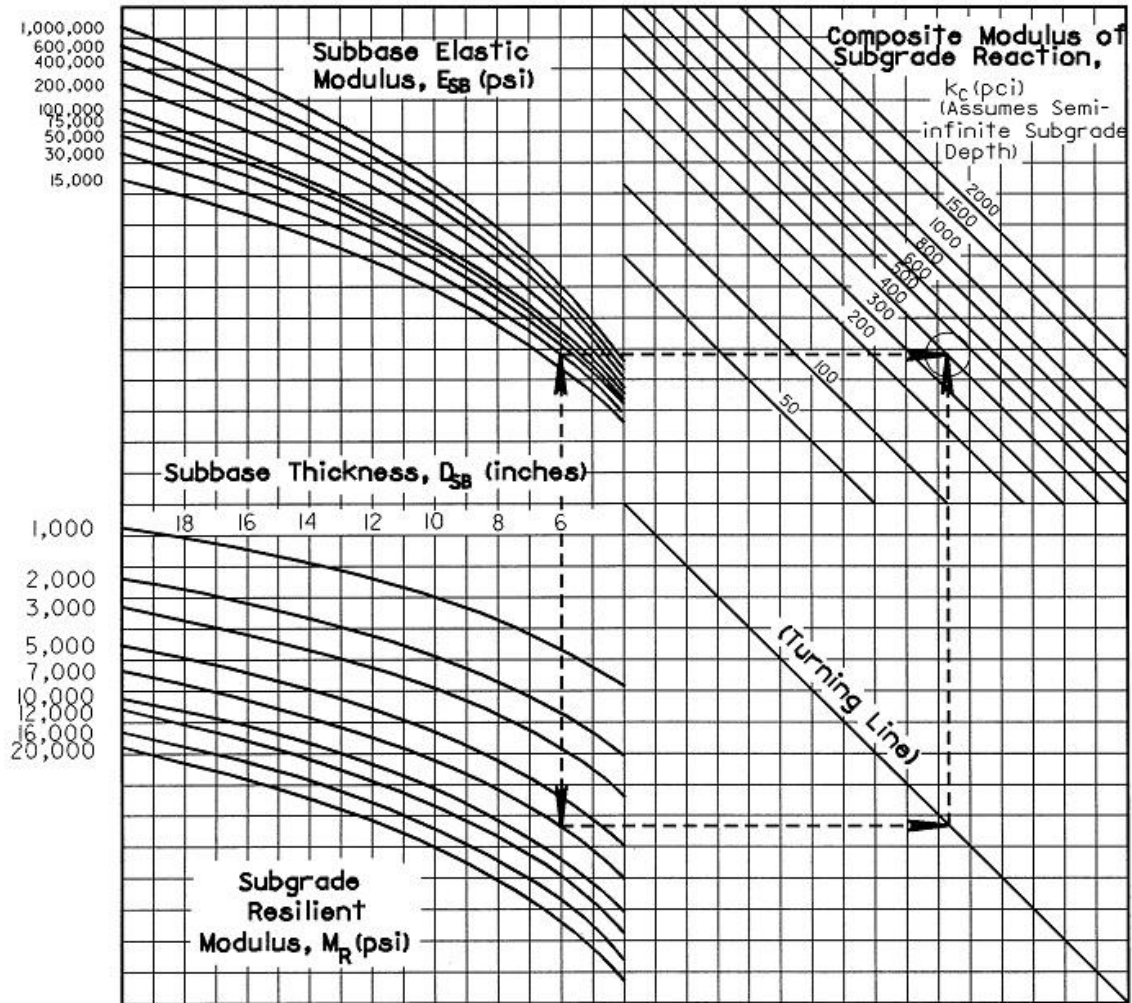


Figura 2.9 Gráfica para la determinación del valor K compuesto propuesto por AASHTO 1993

La guía AC 150/5335-5B de la Administración Federal de Aviación (FAA, 2011) postula que no es práctica la determinación de un módulo de subrasante sobre la parte superior de una subbase, a partir de datos experimentales, al menos en la fase de diseño. Por lo general, un terraplén o una subbase no estarán en su lugar en el momento de realizar cualquier prueba de campo, de modo que el valor de K tendrá que ser asignado sin el beneficio de las pruebas (FAA, 2011). De todas formas, la circular sugiere dos tipos de gráficos para la determinación de un K compuesto para dos tipos de material de apoyo, la figura 2.9 consta de una subbase de agregado triturado bien graduado y la figura 2.10 presenta un material granular arena y grava de empréstito.

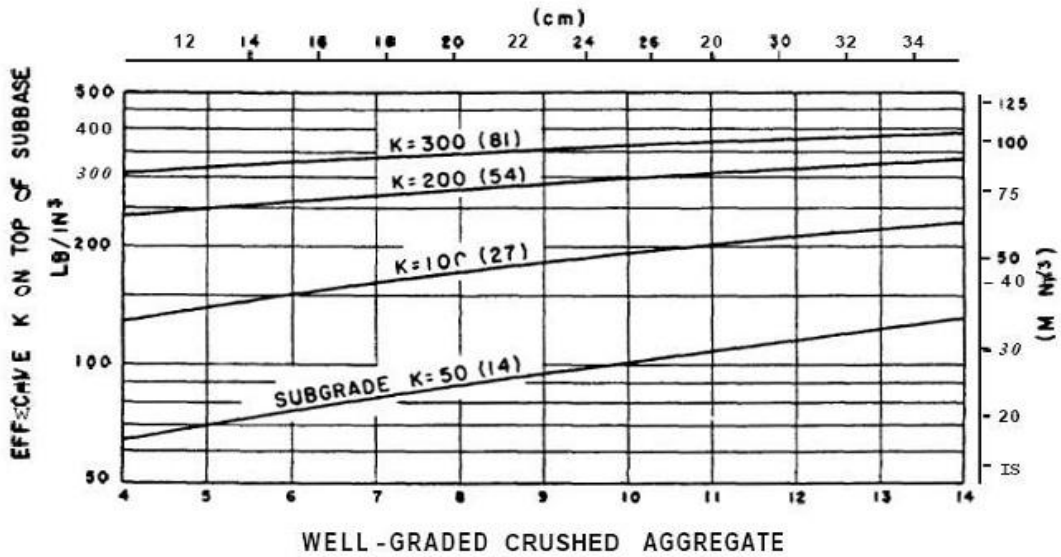


Figura 2.10 Efecto subbase de agregado triturado bien graduado en el soporte de la subrasante, K. (FAA método Westergaard, 2011)

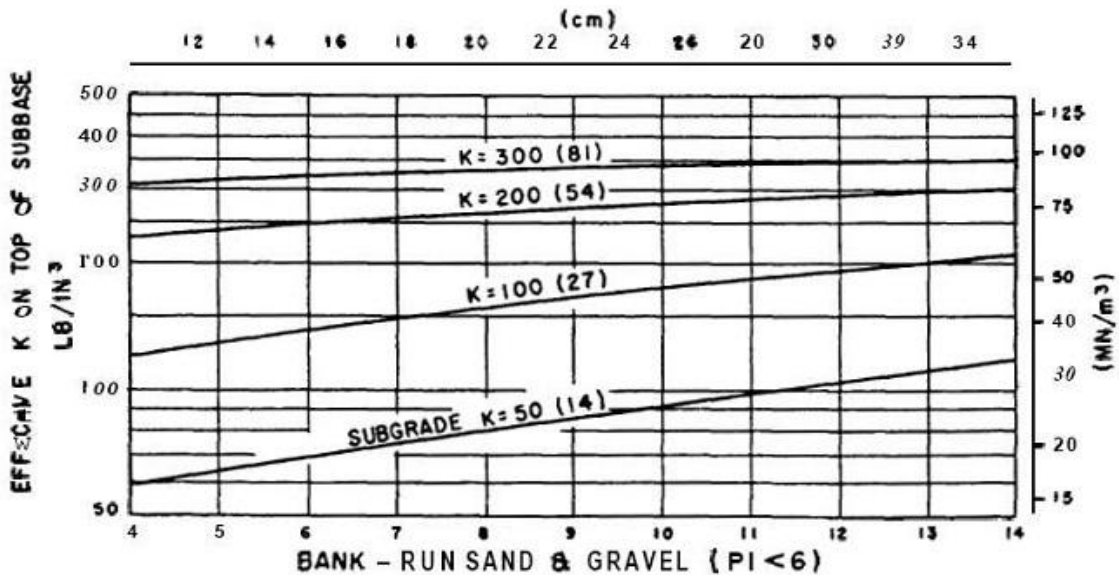


Figura 2.11 Efecto subbase de arena y grava de empréstito en el soporte de la subrasante, K. (FAA método Westergaard, 2011)

El efecto de una capa de subbase adherida o no adherida para un diseño de pavimento de hormigón, se puede efectuar mediante un análisis de esfuerzos de tensión y deflexiones. El informe Subbase and Subgrade Performance Investigation for Concrete Pavement (Jung, Zollinger, Won, & Wimsatt, 2009), ilustra el efecto de 4 tipos de subbase en el valor de K. Dos suelos en condición adherida de 500.000 y 1.000.000 psi de módulos de elasticidad, respectivamente, y dos suelos en condición no adherida de igual módulo de elasticidad que en la condición anterior. La tabla 2.5 contiene los datos utilizados en el análisis, el cual se efectuó a partir del programa ISLAB2000. La figura 2.11 representa los valores de Kc para los distintos tipos de subbase analizados para la condición de carga interior.

Tabla 2.5 Condiciones utilizadas para el análisis

Espesor de losa	8 in	Relación de Poisson	0,15
Módulo de reacción subrasante	200 psi/in	Carga aplicada	18.000 lb
Radio de área de carga	6,180 in	Presión de neumático	75 psi

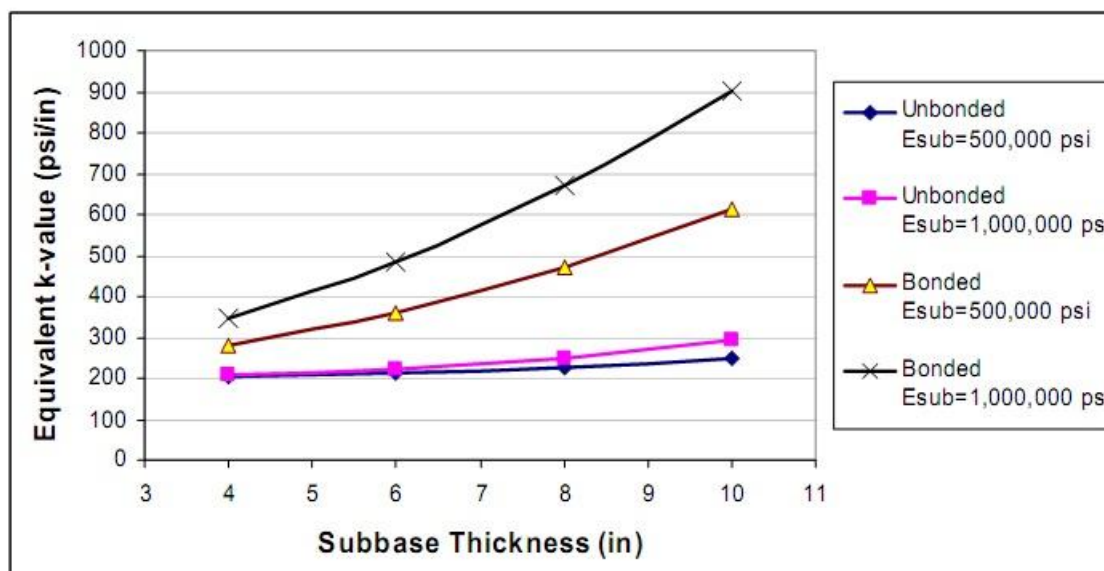


Figura 2.12 Equivalentes valores de Kc por Condición de unión diferente

Las metodologías presentadas demuestran que las subbases entregan un grado de soporte estructural a un pavimento de hormigón, el que se ve reflejado con el valor de Kc, aumentando la capacidad de soporte de un suelo de fundación.

2.2.1- Análisis de Antecedentes Existentes

Como se ha revisado, existe una gran variedad de relaciones para indicar el efecto de una subbase en el valor de K. Para analizar y comparar las relaciones presentadas, a continuación se ilustra una gráfica donde se incluyen las recomendaciones de los métodos mostrados.

La Figura 2.12 incorpora sólo relaciones cuando se presenta suelo de fundación de baja capacidad de soporte, es decir, módulo de reacción de la subrasante de 50 psi/in (14 MPa/m).

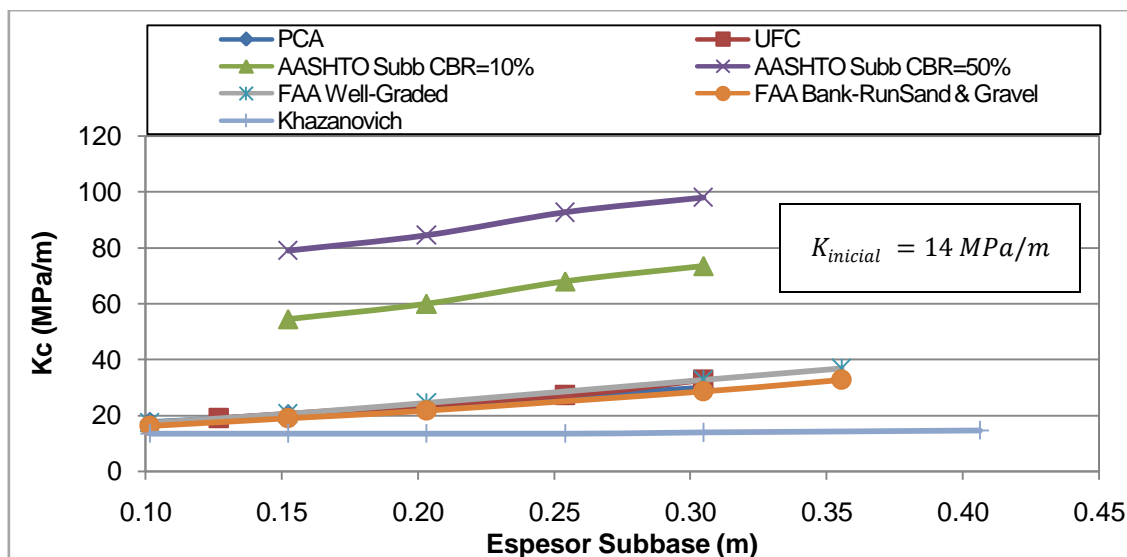


Figura 2.13 Relaciones del efecto de una subbase en el valor de K según diferentes autores

Del gráfico se aprecia, que los valores de Kc, para los métodos de la FAA, UFC y PCA son muy similares entre ellos, no así las recomendaciones de la AASHTO, que están muy por encima del resto. En cambio, la curva propuesta por Khazanovich, recomienda la no inclusión del aumento al valor de K por la existencia de una subbase estabilizada de alto módulo de elasticidad. Las curvas de los métodos de la FAA y UFC, poseen una tendencia hacia un valor de K constante, para espesores de subbase altos (ver figuras 2.7, 2.10 y 2.11). Dicha constante debiera acercarse al valor de K correspondiente a la subbase utilizada, y en ningún caso, Kc debiera superar el valor de K de subbase. En otras palabras, $K \text{ de subrasante} < K_c < K \text{ de subbase}$.

El método de la AASHTO 93, considera la rigidez del material aportante, especificándolo como módulo de elasticidad (E), pero su metodología, poco directa, lo hace impreciso y complicado. Los demás métodos son directos y fáciles de visualizar, los resultados. El problema es que no especifican para qué tipo de subbase están orientadas sus recomendaciones. Por otro lado, en las últimas versiones de la Guía AASHTO 2002 y 2008, reconsidera el método de obtención del K de diseño, modificándolo a K efectivo o eficaz, que representa la compresibilidad de todas las capas debajo de la losa de hormigón.

El significado del Kc en un diseño de pavimento de hormigón es de gran trascendencia, ya que, aumentando en cierto grado la capacidad de soporte de la subrasante, conlleva a la posibilidad de disminuir los espesores de losa. El problema se reduce a encontrar una relación fidedigna para el aumento de K, es por ello que en este estudio se realizan nuevos análisis y recomendaciones que complementen las ya expuestas, las que se presentan en el capítulo 4.

3. MODELOS DE SUELOS DE FUNDACIÓN

Muchos investigadores han intentado crear un modelo práctico que represente adecuadamente el comportamiento físico de un suelo de fundación. El problema se reduce a encontrar una expresión matemática relativamente simple que pueda describir la respuesta del subsuelo dentro de la zona de contacto con un grado razonable de precisión (Bulut, 2001).

En el diseño de pavimentos de hormigón, el modelo de fundación más utilizado, es el de Winkler o Líquido Denso (DL) (Westergaard H. M., 1926) debido a su sencillez, el cual requiere un solo parámetro, a saber, el coeficiente de balasto, K. Sin embargo, no es del todo adecuado cuando se aplica a suelos reales (Khazanovich, 2003). El modelo Sólido Elástico (ES), es considerado como una representación más realista de la respuesta del subsuelo, no obstante, según su metodología, es más bien utilizado por los diseñadores de pavimentos flexibles. Los modelos de Pasternak y Kerr (Khazanovich, 2003), ofrecen una alternativa atractiva a la continuidad de los modelos de Winkler y Sólido Elástico, pero el escaso conocimiento sobre estas fundaciones, atribuyen al modelo de Winkler como el más recomendado para la idealización de un suelo de fundación.

A continuación, se desglosan con mayor detalle los modelos mencionados indicando sus ventajas y limitaciones.

3.1- Fundación de Winkler

El modelo de Winkler o Líquido Denso (DL) consiste en un conjunto infinito de resortes independientes con una constante de resorte K, el módulo de reacción de la subrasante, que es la constante de proporcionalidad entre la presión aplicada y la deflexión de la placa de carga. El modelo asume que la resistencia al corte de la subrasante es despreciable e indica que la fuerza vertical en un punto solo depende de la deflexión vertical del mismo punto y es independiente a las deflexiones en los demás puntos. Es decir, las deformaciones se producen sólo bajo la carga aplicada. Además, son elásticas o recuperables, después de retirar de carga.

La ventaja de este enfoque, es que permite tomar en consideración los fenómenos de transferencia de carga crítica, que se producen en las juntas de las losa de hormigón y el desarrollo de los principales tipos de deterioro, tales como grietas, bombeo y la grieta esquina (Khazanovich, 1994).

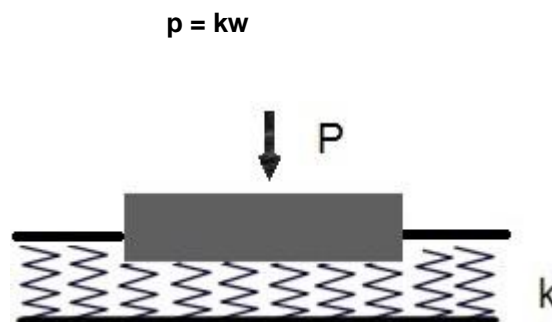


Figura 3.1 Losa sobre fundación Winkler, teoría de Westergaard

P = Esfuerzo vertical
k = Módulo reacción subrasante
w = Deflexión vertical

3.2- Fundación Sólido Elástico

El modelo Sólido Elástico (ES) se considera una representación más realista de los suelos y corresponde a la aplicación de la teoría elástica al suelo de fundación. Las deformaciones en el modelo de ES son de carácter global, es decir, se desarrollan, no sólo bajo el plato de carga, sino también, más allá de ella. Todas las deformaciones son linealmente elásticas. Por otro lado, el modelo ES atribuye, a la fundación, un mayor grado de interacción esfuerzo cortante que se produce en suelos, dando lugar a las predicciones de tensiones infinitas debajo de los bordes y esquinas de una placa que descansa sobre ella. Este modelo también considera un solo parámetro, coeficiente C, que se define como:

$$C = \frac{E_s}{1 - \mu_s^2} \quad ec 3.1$$



Figura 3.2 Losa sobre fundación Sólido Elástico

E_s = Módulo elástico de la subrasante
 μ_s = Razón de Poisson del suelo de fundación

El módulo elástico de la subrasante, al igual que K, se puede determinar mediante ensayos de laboratorio, correlaciones y retroanálisis. A continuación, se presentan algunas de las correlaciones existentes en la literatura para la obtención de este parámetro.

Correlación según Manual de Carreteras (Vol. 3, MOP, 2012)

$$E_s = 17,6 * CBR^{0,64} \quad CBR < 12\% \quad ec 3.2$$

$$E_s = 22,1 * CBR^{0,55} \quad 12 \leq CBR < 80\% \quad ec 3.3$$

Donde,

E_s = Módulo de elasticidad de la subrasante, [MPa]

CBR = Razón de soporte de California, [%]

Correlación según Administración Federal de Aviación (FAA)

Según la FAA, el módulo para el suelo de fundación puede expresarse como coeficiente de balasto (K) o como módulo de elasticidad (E_s) (FAA, 2009). Para la estimación de E_s recomienda las siguientes relaciones:

$$E_s = 26 * k^{1,284} \quad ec \ 3.4$$

$$E_s = 1500 * CBR \quad ec \ 3.5$$

Donde,

E_s = Módulo de elasticidad de la subrasante, [psi]

K = Módulo de reacción de la subrasante, [psi/in]

CBR = Razón de soporte de California, [%]

Correlación según Método Shell

Relación empírica entre CBR y módulo de la subrasante recomendada por la Shell.

$$E_s = 10 * CBR \quad ec \ 3.6$$

Donde,

E_s = Módulo de elasticidad de la subrasante, [MPa]

CBR = Razón de soporte de California, [%]

3.3- Fundación de Pasternak

La fundación de Pasternak (Pasternak, 1954), también conocida como el modelo de Vlasov, ofrece una alternativa atractiva a la continuidad de los modelos (ES) y Winkler, incorporando una capa de cizalladura (corte), descansando en la parte superior de los resortes de Winkler. Dicha capa es capaz de transferir las cargas en dirección horizontal, logrando la continuidad de los desplazamientos verticales. Además, el perfil de deflexión predicho por el modelo de Pasternak desaparece mucho más rápido que la área correspondiente al modelo Sólido Elástico y puede ser una mejor aproximación de las deflexiones observadas en una base real de profundidad finita (Khazanovich, 2003). La limitación de esta modelación surge en la determinación de los dos parámetros que el modelo requiere, un coeficiente de compresión, K, y un coeficiente cortante, G. La falta de información sobre estos parámetros debilita la práctica del modelo.

La fundación se rige por la siguiente ecuación diferencial:

$$p = kw - G\nabla^2 w$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$$

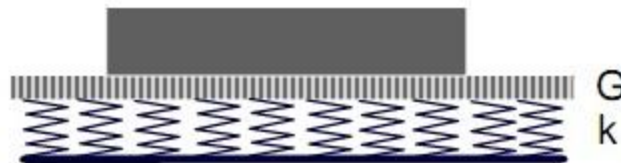


Figura 3.3 Losa sobre fundación de Pasternak

P = Esfuerzo vertical

K = Coeficiente de compresión (módulo subrasante)

w = Deflexión vertical

G = Módulo de corte

∇^2 = Operador Laplaciano

3.4- Fundación de Kerr

El modelo propuesto por Kerr (1964) sugiere la inserción de una base Winkler en la parte superior de la fundación de Pasternak. Este modelo se considera una fundación de dos capas, suponiendo que la capa superior es muy delgada, de modo que su rigidez cortante es despreciable (Khazanovich, 1994). Por otra parte, si la rigidez de los resortes de Winkler superiores son lo suficientemente grande, los resultados del modelo Kerr serían los mismos que con los del modelo de Pasternak (Ioannides & Khazanovich, 1993). Sin embargo, una rigidez muy alta para resortes Winkler superiores causaría inestabilidad numérica y no convergencia de la solución de elementos finitos. Una de las debilidades del modelo Kerr es su requisito de tres parámetros que son difíciles de determinar experimentalmente.

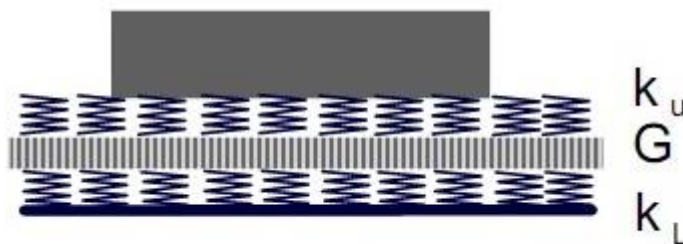


Figura 3.4 Losa sobre fundación Kerr

3.5- Fundación ZSS

Zhemochkin y Sinitsyn (1947) y luego Shtaerman (1949), idealizaron otro modelo de dos parámetros, que resulta de una combinación de las fundaciones de Winkler y Sólido Elástico. Conocido como el modelo ZSS, se compone de una serie de resortes independientes de rigidez, K , sobre un semi-espacio elástico caracterizado por el parámetro C , definido por la ecuación 3.1. La subrasante ZSS permite una discontinuidad en el perfil de deflexión en un borde de la losa cargada, que es equivalente al modelo de Winkler (Khazanovich, 1994).

Existen otros tipos de modelos de suelo de fundación tales como, fundación Filonenko-Borodich, modelo de Cherkasov-Klein. Sin embargo, su escasa información, hace más compleja su utilidad.

En los últimos años se han logrado, importantes avances en el desarrollo de la analítica de herramientas para el análisis de losas sobre una fundación. Aun así, todos estos modelos tienen sus limitaciones. Por ejemplo, si bien el modelo de Winkler es el más sencillo y más utilizado, el problema, es que el valor de K no es único, y depende de varias propiedades de la placa y el suelo, así como de la carga. El modelo Sólido Elástico es más realista, sin embargo es más exigente introducirlo a los programas computacionales.

Generalmente, una comparación entre los modelos de Winkler y Sólido Elástico (ES), indica que las fundaciones ES tienen una cuenca de deflexión mucho más grande (Poulos, 2000).

Las comparaciones entre los modelos de Winkler y Pasternak presentados por Pronk (1993) sugieren que esta última puede ser una mejora del modelo de Winkler. Pero si el módulo de corte G de la fundación de Pasternak tiende a 0, el modelo se reduce a la fundación de Winkler. La fundación de Pasternak es una representación más realista que el modelo de Winkler, pero la dificultad en el uso del modelo consiste en determinar los parámetros del suelo; valores experimentales para el parámetro G , no se proporcionan en la literatura.

Por otra parte, Khazanovich y Ioannides (1993) demostraron que el modelo de Kerr produce prácticamente los mismos resultados que el modelo de Pasternak, si la rigidez de la capa superior del resorte es suficientemente alta. Además, para altas relaciones de k_u/k_l , el modelo de Kerr se comporta como una fundación de Pasternak, mientras que para muy bajos k_u/k_l , el modelo de Kerr se aproxima al modelo Winkler (Khazanovich, 1994).

Los resultados de un estudio realizado por la NCHRP (2002), mostraron que la fundación de Pasternak ofrece una modelación de la subrasante más realista que el modelo Winkler y mucho menos exigente computacionalmente que el modelo Sólido Elástico. Sin embargo, por las siguientes razones, el equipo de investigación no recomienda este modelo para la inclusión en la Guía de Diseño 2002:

- 1- Aunque el modelo es bien conocido por los investigadores, no lo es por los practicantes.
- 2- Actualmente, no hay pautas establecidas y verificadas para la selección de los parámetros del modelo de Pasternak, G y K . Además, el valor de K del modelo de Pasternak es diferente al valor de K de la fundación de Winkler, lo que podría crear confusión para los ingenieros.
- 3- La mayoría de la investigación relacionada con el modelo de Pasternak se centra en el análisis de una sola losa sometido sólo a una carga de tráfico (sin efecto alabeo). Aunque la última versión de ILLISLAB (software para el análisis de pavimentos de hormigón) permite el análisis de alabeo con el modelo de Pasternak, se trata de una tecnología relativamente nueva y, las pruebas de terreno y calibración, podrían ser requeridas.
- 4- Casi todos los métodos disponibles para el análisis de pavimento de hormigón, utilizan el modelo de subrasante DL. Por lo tanto, el cambio al modelo de Pasternak puede causar dificultades en la recalibración de los métodos.

Por ello, el equipo de investigación, llegó a la conclusión de que, en la actualidad, a pesar de sus limitaciones, la fundación Líquido Denso (DL) o Winkler, es el mejor modelo para su uso en un procedimiento de diseño teórico empírico de pavimentos de hormigón.

Según lo presentado, este estudio, se basará en la fundación de Winkler para la modelación del suelo de subrasante.

4. ANÁLISIS TENSIONAL DE LOSAS CORTAS DE HORMIGÓN APOYADOS EN SUELOS DE BAJA CAPACIDAD DE SOPORTE

4.1- Introducción

En este capítulo se analiza el comportamiento de losas cortas de hormigón apoyadas en suelos de fundación de baja capacidad de soporte, es decir, subrasante de $CBR < 3\%$. Para esto, es necesario obtener tensiones y deflexiones en la losa para distintas configuraciones de carga y condiciones de borde.

El capítulo incluye la evaluación del efecto de una subbase granular y/o una capa de mejoramiento, tanto en la estructura de un pavimento de hormigón de losas cortas, como en el suelo de fundación, es decir, en el valor compuesto entre los módulos de una capa granular y suelo subrasante.

El análisis se realiza en base a la teoría de Westergaard (1926) que idealiza la losa de hormigón como una placa de espesor medio sobre una cama de resortes de rigidez K (fundación Winkler). La teoría considera 3 condiciones de carga: interior, borde y esquina, las que se analizarán en términos de tensiones y deflexiones en la losa. Los resultados se presentarán de acuerdo a la forma adimensional que Westergaard sugiere para la investigación, desde el punto de vista teórico.

Para el cálculo de las respuestas de una losa corta de hormigón, ante una carga aplicada, se utiliza ISLAB2000, programa basado en el método de elementos finitos, diseñado específicamente para el análisis de pavimentos de hormigón. Los esfuerzos obtenidos con ISLAB2000 se analizarán junto con las ecuaciones de Westergaard para cada condición de carga.

4.1.1- Consideraciones para el análisis

Para llevar a cabo el análisis, es necesario precisar los criterios adoptados durante este estudio. A continuación, se repasan las variables que intervienen en él.

4.1.1.1- Teoría de Westergaard

Las ecuaciones de Westergaard, permiten describir las respuestas de un pavimento de hormigón, originadas por una determinada sollicitación actuante sobre la estructura. Sin embargo, la teoría posee, entre otras, varias limitaciones:

- Dimensión de losa infinita – semi-infinita
- Contacto completo entre losa y suelo de fundación
- Sistema de una capa (sin base/subbase)
- Carga circular y única.

Dada las limitaciones de las ecuaciones de Westergaard sólo es compatible la comparación con ISLAB2000 para los casos de sistema de una capa, es decir, losa sobre subrasante sin base o subbase.

Por otro lado, la forma adimensional que Westergaard propone para el análisis de las respuestas de la losa, se rige por las siguientes funciones:

Forma funcional adimensional de la tensión en la losa (Westergaard H. M., 1926):

$$\frac{\sigma h^2}{P} = f\left(\frac{a}{l}\right) \quad ec 4.1$$

Forma funcional adimensional de la deflexión en la losa (Westergaard H. M., 1926):

$$\frac{wkl^2}{P} = f\left(\frac{a}{l}\right) \quad ec 4.2$$

Donde,

a/l = Parámetro adimensional para el efecto del tamaño del área cargada

σ = Tensión máxima de la losa

h = Espesor de losa

P = Carga aplicada

w = Deflexión máxima de la losa

k = Módulo de reacción de la subrasante

a = Radio del área de carga

l = Radio de rigidez relativa losa-suelo fundación

L = Largo de la losa

4.1.1.2- Propiedades de losa de hormigón

Para caracterizar la losa corta de hormigón, el espesor de losa varía entre 8 a 15 cm, donde el largo queda en función del parámetro adimensional " L/l ". Dicho parámetro permite, al análisis, evaluar el efecto del tamaño de losa, o sea el largo de losa. Cabe mencionar, que las losas se consideran cuadradas y se asume un contacto completo entre losa y capa de apoyo. Dicho de otra manera, el análisis no incluye un diferencial de temperatura en las losas, por lo cual el fenómeno de alabeo no es considerado. Por otra parte, el módulo de elasticidad del hormigón (E_h) se establece con un valor de 28.000 MPa y una razón de Poisson (μ) de 0,15 (valores típicos en hormigón).

4.1.1.3- Capas de apoyo

Como ya se adelantó, se consideraran 2 tipos de material de apoyo, no adherido, para el análisis, una subbase granular correspondiente a un CBR=50% y una capa de mejoramiento de CBR=10%. Los espesores van del orden de 15 a 64 cm para la subbase granular, mientras que para el mejoramiento, fluctúan entre 15 a 100 cm. La razón de Poisson (μ) para ambos materiales adopta un valor de 0,35.

4.1.1.4- Suelo de fundación o Subrasante

El suelo subrasante se modela a partir de la fundación de Winkler, modelo incorporado en ISLAB2000, donde el valor del módulo de reacción de la subrasante, se fija en 14 MPa/m para todos los casos (correspondiente a CBR=2%), estableciendo así, un suelo de subrasante de mala calidad.

4.1.1.5- Carga aplicada

La configuración de la carga consiste en una Rueda Simple de sección cuadrada, la que es aplicada solo en sentido vertical. Los parámetros, carga, presión de inflado del neumático y radio de área de carga resultan de la variable adimensional " a/l ".

De esta manera los datos de entrada al software de elementos finitos, ISLAB2000, quedan predeterminados por los parámetros adimensionales " a/l " y " L/l ".

Los valores de las variables adimensionales considerados son los siguientes:

" a/l ": {0,05; 0,10; 0,20; 0,30; 0,40}

" L/l ": {2, 5}

Cabe decir, que el rango de los valores adimensionales vienen dados por las siguientes razones:

Para valores de " a/l " menores a 0,05, dará lugar a un radio de área cargada muy inferior a lo que normalmente asemeja una carga tipo Rueda Simple o un radio de rigidez relativa excesivamente alto. En cambio, para " a/l " mayores a 0,40, podría conllevar a radios de área cargada muy superiores a los permitidos, de acuerdo a una carga de rueda simple o radios de rigidez relativa muy bajos.

Respecto a " L/l ", para valores menores a 2, las losas están expuestas a tomar dimensiones muy pequeñas, ya sea menores o iguales a 90 cm, lo que se considera losas demasiado pequeñas para el análisis. Mientras tanto que, para valores de " L/l " mayores a 5, el largo de losa podría bordear los 5 m, acercándose más a un largo de losa tradicional, que a la de una losa corta de hormigón.

A continuación, se presenta la tabla 4.1 con los valores de los parámetros analizados.

Tabla 4.1 Valores parámetros analizados

L/l	a/l	a [m]	l [m]	h [m]	E_h [MPa]	K [MPa/m]	L [m]	P [KN]	p [MPa]	T_c Transversal [%]	T_c Longitudinal [%]
2	0,05	0,05	0,87	0,15	28.000	14	1,74	10	1,241	50	50
	0,10	0,08	0,78	0,13			1,56	20	1,034	50	50
	0,20	0,12	0,65	0,10			1,30	20	0,414	50	50
	0,30	0,18	0,60	0,09			1,20	40	0,414	50	50
	0,40	0,21	0,55	0,08			1,10	60	0,414	50	50
	0,05	0,05	0,87	0,15			4,35	10	1,241	0	0
5	0,10	0,08	0,78	0,13	28.000	14	3,90	20	1,034	0	0
	0,20	0,12	0,65	0,10			3,25	20	0,414	0	0
	0,30	0,18	0,60	0,09			3,00	40	0,414	0	0
	0,40	0,21	0,55	0,08			2,75	60	0,414	0	0

Nomenclatura:

L/l = Parámetro adimensional para el efecto del tamaño del largo de losa

a/l = Parámetro adimensional para el efecto del tamaño del área cargada

a = Radio del área de carga

l = Radio de rigidez relativa losa-suelo de fundación

h = Espesor de losa

E_h = Módulo de elasticidad del hormigón

K = Módulo de reacción de la subrasante

L = Largo de losa

P = Carga aplicada

p = Presión de inflado del neumático

T_c = Transferencia de carga en junta transversal y longitudinal

Ahora, dado que el análisis es válido para los valores ya mencionados de " L/l ", se ha propuesto el siguiente criterio para el desarrollo del estudio:

Para las losas que se analicen según " $L/l=2$ ", se considerará un sistema de 9 losas cortas, donde la carga y foco de atención se centrará en la losa del medio. Este criterio se adoptó, debido que el largo de losa para dicha configuración (" $L/l=2$ ") queda expuesto a ser muy pequeño. De no ser así, las condiciones de borde, para las distintas configuraciones de carga, no serían válidas. O mejor dicho, no se representarían adecuadamente. A partir de lo dicho, el sistema de 9 losas cortas contendrá una transferencia de carga del 50% en ambos sentidos. Cabe mencionar, que este criterio no afectará el análisis, más bien, dará resultados más propicios para el objetivo de este estudio.

Para el caso de " $L/l=5$ ", el sistema de losa consiste en una sola losa, ya que el largo de losa será apto para las condiciones de borde.

Este enfoque se presentará para las 3 condiciones de carga a analizar. Un esquema del criterio adoptado se podrá visualizar en cada acápite correspondiente a la condición de carga.

4.2- Condición de Carga Interior

Esta condición se refiere a la carga ubicada al centro de la losa, generando tensión y deflexión máxima al centro de la losa de hormigón.

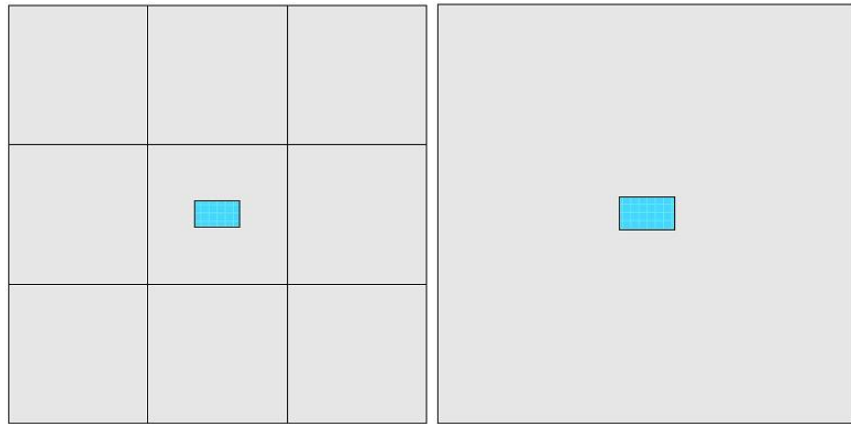


Figura 4.1 Configuración de carga Interior para " $L/l=2$ " y " $L/l=5$ ", respectivamente

4.2.1- Análisis de Tensión

La carga ubicada al centro de la losa genera tensión de tracción máxima en la fibra inferior de la losa, y en el punto exacto donde es aplicada la carga.

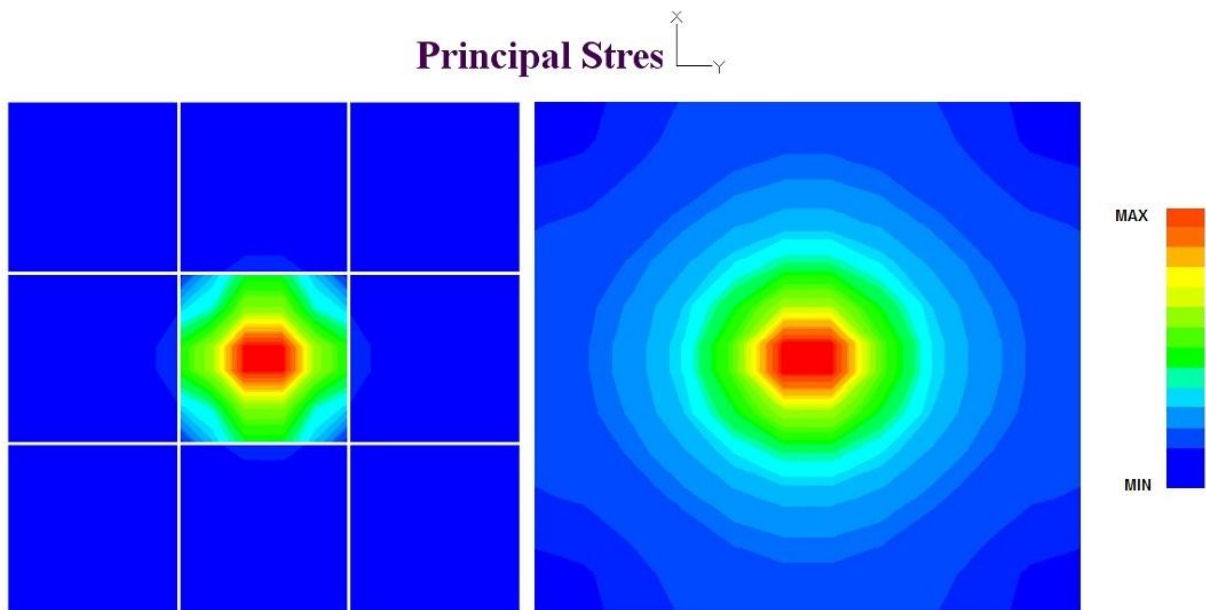


Figura 4.2 Distribución de tensión para carga interior obtenidas con ISLAB2000 para casos " $L/l=2$ " y " $L/l=5$ ", respectivamente

La ecuación de Tensión de Westergaard (Westergaard H. M., 1926) para la condición carga interior es:

$$\sigma_i = \frac{3 \cdot (1 + \mu) \cdot P}{2\pi h^2} \cdot \left(\ln\left(\frac{l}{b}\right) + 0,6159 \right) \quad \text{ec 4.3}$$

Donde,

$$l = \sqrt[4]{\frac{E_h \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \mu^2) \cdot k}} \quad \text{ec 4.4}$$

$$a = \sqrt{\frac{P}{p \cdot \pi}} \quad \text{ec 4.5}$$

$$b = a, \quad \text{cuando } a \geq 1,724 \cdot h \quad \text{ec 4.6}$$

$$b = \sqrt{1,6 \cdot a^2 + h^2} - 0,675 \cdot h, \quad \text{cuando } a < 1,724 \cdot h \quad \text{ec 4.7}$$

σ_i = Tensión de tracción máxima en fibra inferior de la losa

μ = Razón de Poisson hormigón

P = Carga aplicada

h = Espesor de la losa

l = Radio de rigidez relativa losa-suelo fundación

E_h = Módulo de elasticidad del hormigón

k = Módulo de reacción de la subrasante

a = Radio del área de carga

p = Presión de inflado de neumático

La forma funcional adimensional de la tensión en la losa para esta condición de carga, está dada por la expresión 4.1:

$$\frac{\sigma \cdot h^2}{P} = f \left(\frac{a}{l}, \frac{L}{l} \right)$$

Donde,

σ = Tensión de tracción máxima en la fibra inferior de la losa

h = Espesor de losa

P = Carga aplicada

a = Radio del área de carga

l = Radio de rigidez relativa losa-suelo fundación

L = Largo de la losa

Se obtienen tantos valores para la tensión, como variaciones de los parámetros " a/l ", " L/l " y espesores de, subbase y capa de mejoramiento se realicen.

Los valores de las variables adimensionales considerados son los siguientes:

" a/l ": {0,05; 0,10; 0,20; 0,30; 0,40}

" L/l ": {2, 5}

Los espesores de las capas de apoyo consideradas son los siguientes:

Espesor de subbase (cm) : {0; 15; 25; 38; 51; 64}

Espesor de mejoramiento (cm) : {0; 15; 25; 38; 51; 100}

A continuación se presenta el comportamiento tensional en función de los parámetros adimensionales " a/l ", " L/l " y producto de una capa granular.

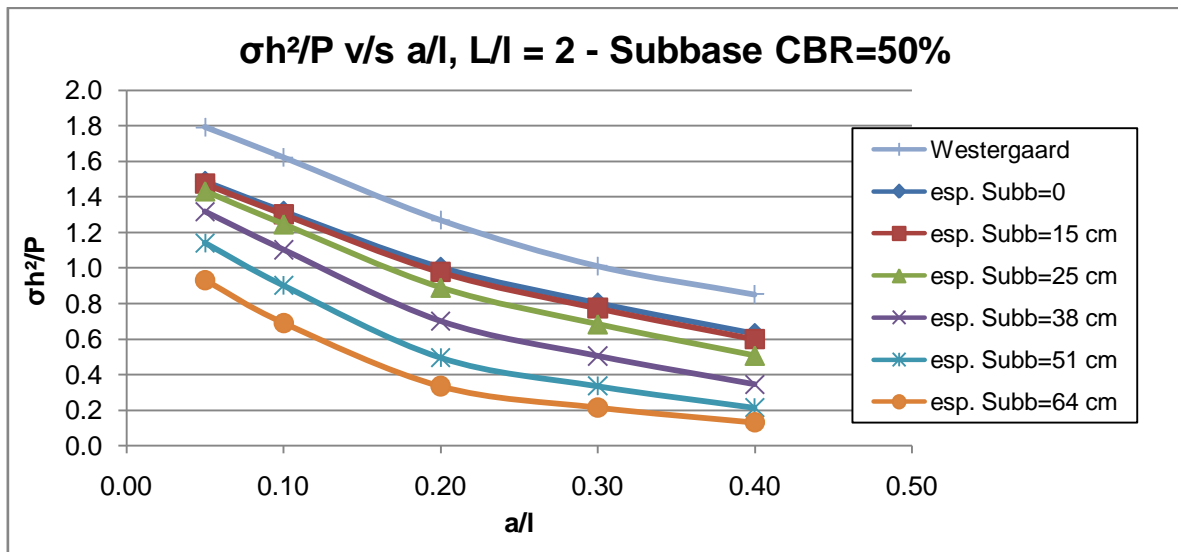


Figura 4.3 Comportamiento Tensional producto Subbase granular de CBR=50% para " L/l "=2, Carga Interior

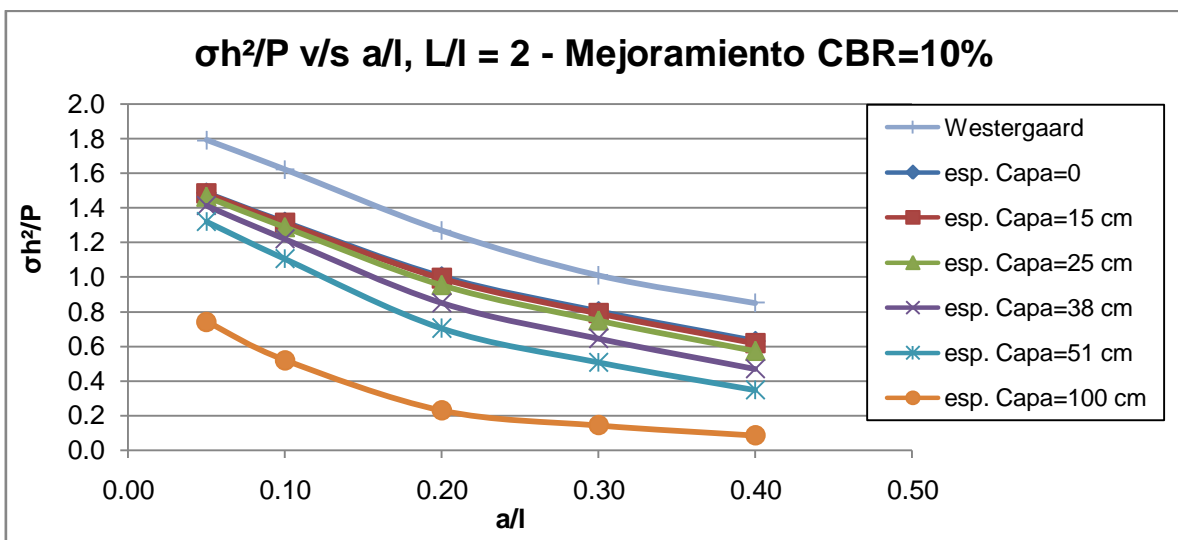


Figura 4.4 Comportamiento Tensional producto Mejoramiento de CBR=10% para " L/l "=2, Carga Interior

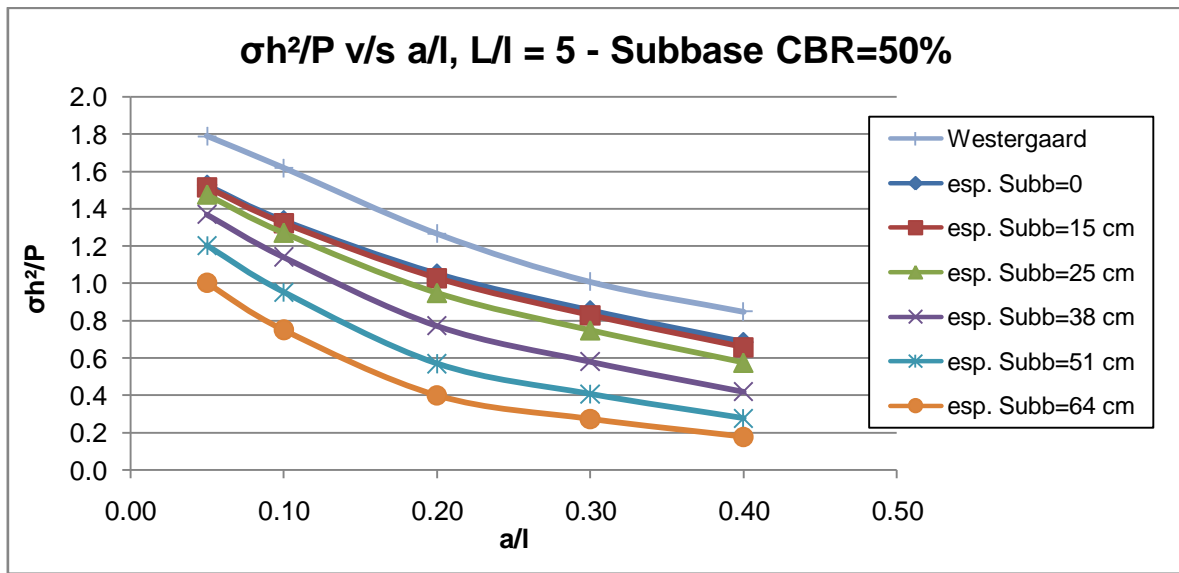


Figura 4.5 Comportamiento Tensional producto Subbase granular de CBR=50% para " L/l "=5, Carga Interior

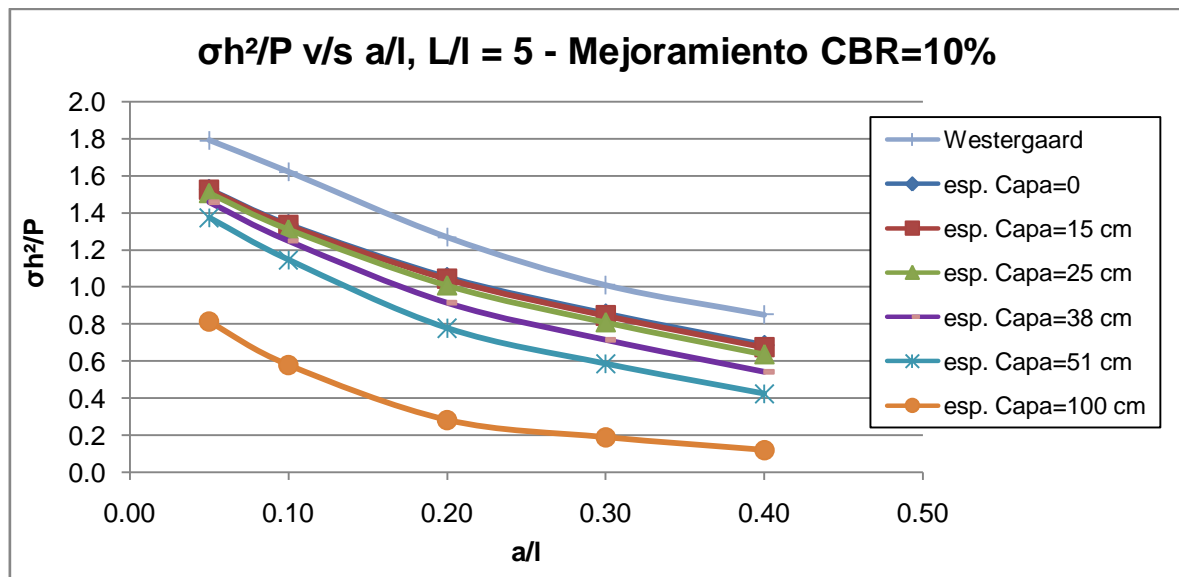


Figura 4.6 Comportamiento Tensional producto Mejoramiento de CBR=10% para " L/l "=5, Carga Interior

De los gráficos, se aprecia con claridad, que los resultados obtenidos con ISLAB2000 poseen la misma tendencia que la ecuación de Westergaard, y que al aumentar el espesor de una capa granular, las tensiones disminuyen. El comportamiento tensional entre un material y otro, es similar, al menos hasta el espesor de 38 cm. De ahí en adelante, se puede visualizar una diferencia más significativa del aporte de una capa u otra.

El comportamiento tensional entre los " L/l ", es semejante. Solo se apunta que a mayor " L/l ", las tensiones incrementan.

4.2.2- Análisis de Deflexión

Para esta condición, la deflexión máxima ocurre en el punto exacto donde es aplicada la carga, es decir, al centro de la losa.

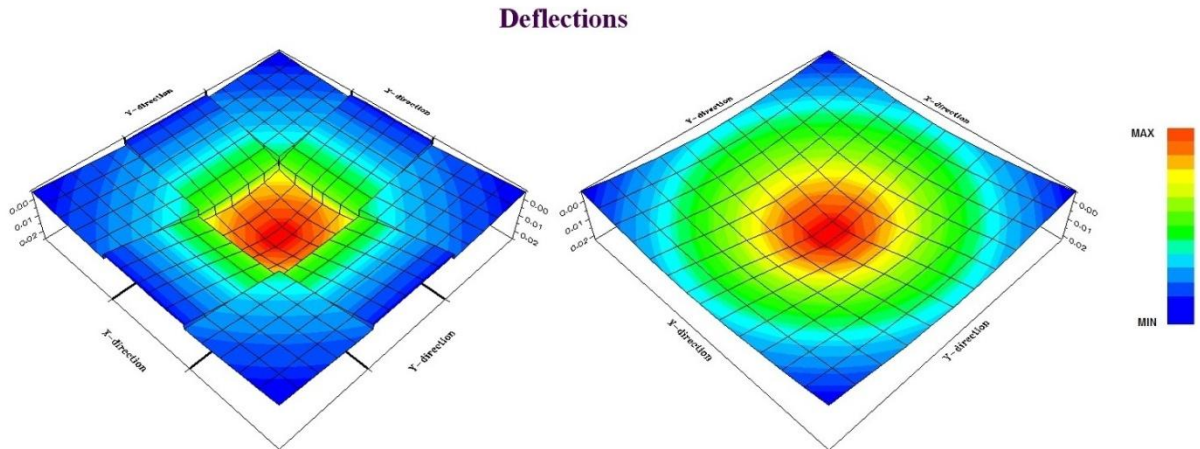


Figura 4.7 Distribución de deflexión para carga interior obtenidas con ISLAB2000 para casos “L/l”=2 y “L/l”=5, respectivamente

La ecuación de Deflexión de Westergaard (Westergaard H. M., 1939) para la condición carga interior es:

$$w_i = \frac{P}{8kl^2} \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{2\pi} \cdot \left[\ln\left(\frac{a}{2l}\right) - 0,673 \right] \cdot \left(\frac{a}{l}\right)^2 \right\} \quad \text{ec 4.8}$$

Donde,

w_i = Deflexión máxima al centro de la losa

k = Módulo de reacción de la subrasante

P = Carga aplicada

a = Radio del área de carga

l = Radio de rigidez relativa losa-suelo fundación

La forma funcional adimensional de la deflexión en la losa para esta condición de carga, está dada por la expresión 4.2:

$$\frac{wkl^2}{P} = f\left(\frac{a}{l}, \frac{L}{l}\right)$$

Donde,

w = Deflexión máxima de la losa

k = Módulo de reacción de la subrasante

P = Carga aplicada

a = Radio del área de carga

l = Radio de rigidez relativa losa-suelo fundación

L = Largo de la losa

Se obtienen tantos valores para la deflexión, como variaciones de los parámetros " a/l ", " L/l " y espesores de subbase se realicen.

Los valores de las variables adimensionales considerados son los siguientes:

" a/l ": {0,05; 0,10; 0,20; 0,30; 0,40}

" L/l ": {2, 5}

Los espesores de las capas de apoyo consideradas son los siguientes:

Espesor de subbase (cm) : {0; 15; 25; 38; 51; 64}

Espesor de mejoramiento (cm) : {0; 15; 25; 38; 51; 100}

A continuación se presenta el comportamiento de deflexión en función de los parámetros adimensionales " a/l ", " L/l " y producto de una capa granular.

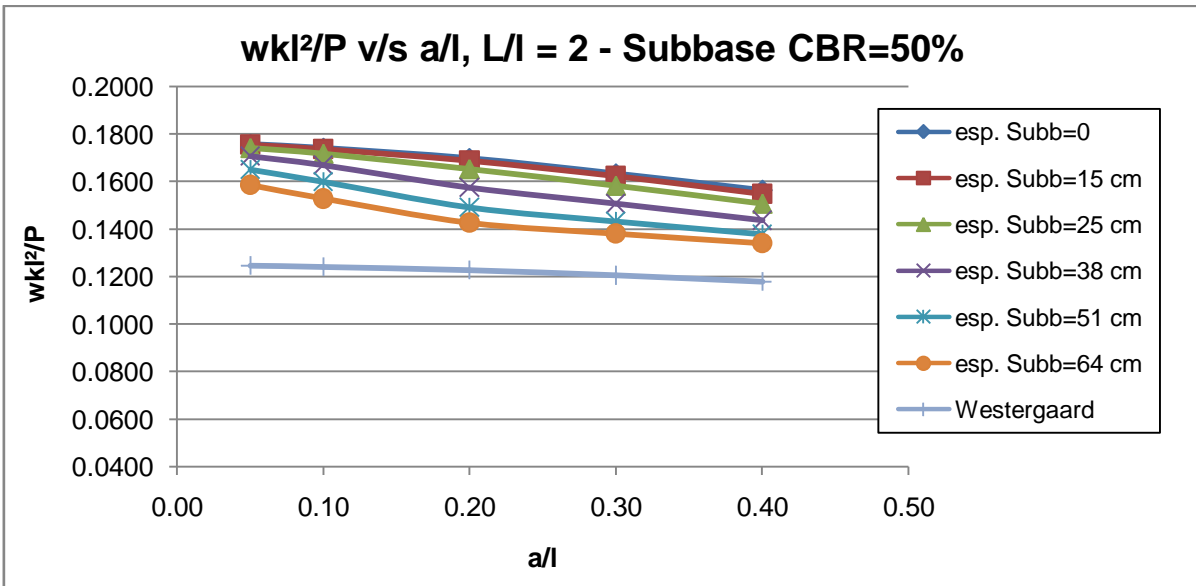


Figura 4.8 Comportamiento Deflexión producto Subbase granular de CBR=50% para “L/l”=2, Carga Interior

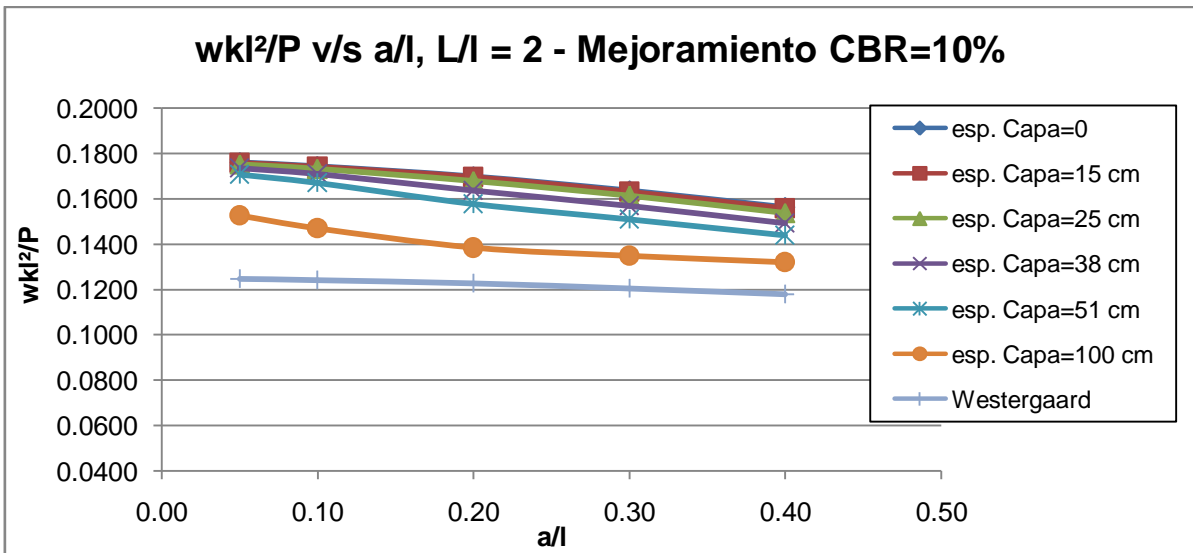


Figura 4.9 Comportamiento Deflexión producto Mejoramiento de CBR=10% para “L/l”=2, Carga Interior

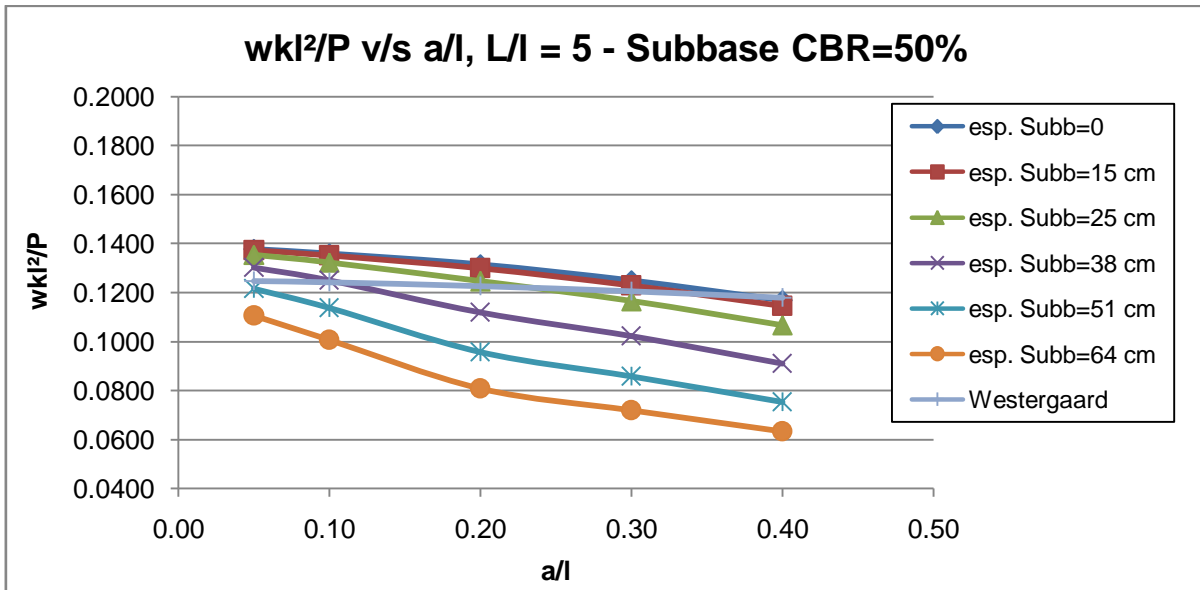


Figura 4.10 Comportamiento Deflexión producto Subbase granular de CBR=50% para “L/l”=5, Carga Interior

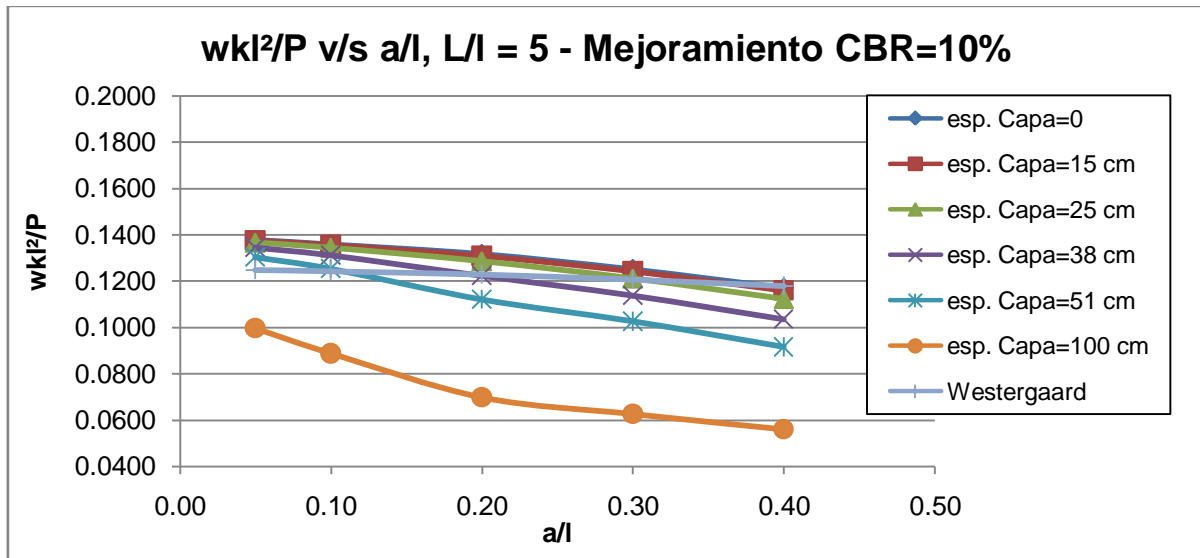


Figura 4.11 Comportamiento Deflexión producto Mejoramiento de CBR=10% para “L/l”=5, Carga Interior

Los gráficos confirman que las subbases ayudan a aminorar las deflexiones, sin embargo, el aporte es menor respecto al análisis de tensiones. Además, las deflexiones disminuyen a medida que aumenta “L/l”, es decir, para sistemas de losas cortas, las deflexiones aumentan.

Por otro lado, la comparación entre las capas intermedias, es despreciable, dicho de otra manera, se provoca la misma deflexión, con un material u el otro, al menos hasta espesor de 25 cm, de ahí en adelante, se aprecia una diferencia un poco más significativa. Por lo demás, las subbases entregan un mayor aporte a medida que aumenta “L/l”.

Los resultados de los esfuerzos obtenidos, ya sea con ISLAB2000 y Westergaard, para este condición de carga, se presentará en el ANEXO A.

4.2.3- Efecto de una Capa Granular en el Módulo de Reacción de Subrasante K

En este acápite se estima y analiza la capacidad de soporte que una capa granular puede otorgar a un suelo de subrasante de mala calidad ($CBR < 3\%$), caracterizándolo con el módulo de reacción compuesto, K_c . Para ello, utilizando ISLAB2000 y a partir del análisis de los esfuerzos de tensión y deflexión, es posible obtener el K_c realizando el siguiente ejercicio:

Una vez calculada la tensión o deflexión de la losa, en un sistema de dos capas (losa-subbase-subrasante), se busca qué valor de K necesita un sistema de una capa para originar el mismo valor de tensión o deflexión de un sistema de dos capas, bajo las mismas condiciones de carga y borde. La Figura 4.12 representa esquemáticamente la metodología descrita.

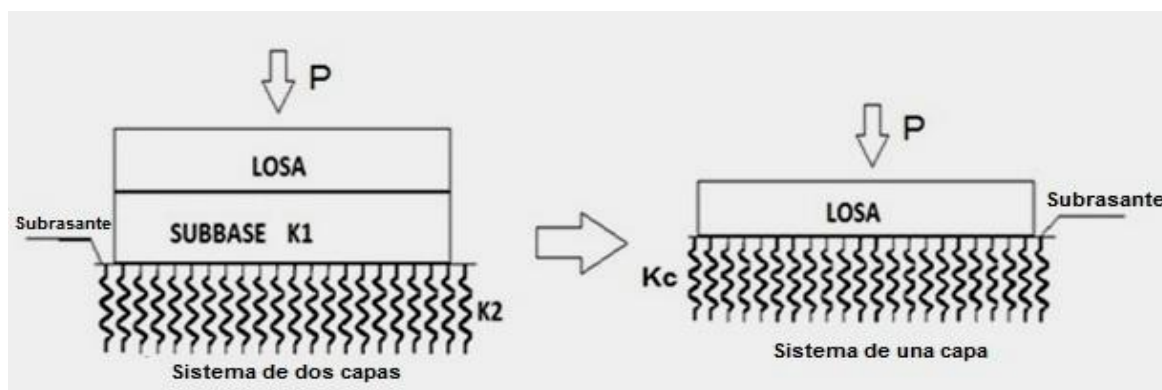


Figura 4.12 Esquema representativo para la obtención del valor de K compuesto.

En otras palabras, K_c compuesto entre K_1 y K_2 , tal que $\sigma_1 = \sigma_2$ ó $w_1 = w_2 \rightarrow K_2 < K_c < K_1$

Donde,

P = Carga aplicada

K_1 = Módulo de reacción de la subbase

K_2 = Módulo de reacción de la subrasante

K_c = Módulo de reacción compuesto

σ_1 = Tensión de tracción máxima de la losa sistema de dos capas

σ_2 = Tensión de tracción máxima de la losa sistema de una capa

w_1 = Deflexión máxima de la losa sistema de dos capas

w_2 = Deflexión máxima de la losa sistema de una capa

Como ya se mencionó antes, el valor de K obtenido con el ensayo de placa de carga, depende tanto de las propiedades de la placa, como las de la carga, además, por supuesto, de las propiedades del material y el tipo de suelo. Para no ausentar dichas condicionantes, ya que esta metodología de obtención de K_c se basa en el principio de placa de carga, las estimaciones, para los distintos espesores de las capas de apoyo consideradas, se presentarán gráficamente mediante curvas en función del parámetro adimensional " a/l ". Dicho parámetro permite la evaluación de K_c , para distintos niveles de cargas y propiedades de losa, emulando así, la teoría del ensayo de placa de carga.

4.2.3.1- Efecto de una capa granular en el valor de K en función del comportamiento tensional

De acuerdo a lo presentado en el acápite anterior 4.2.3, se realiza el cálculo del módulo de reacción compuesto, K_c , en función de los esfuerzos de tensión obtenidos en 4.2.1.

La representación gráfica del valor de K_c según el material y espesor de la capa de apoyo, en función de los parámetros adimensionales " a/l " y " L/l ", se muestra en las siguientes figuras. (K inicial 14 MPa/m)

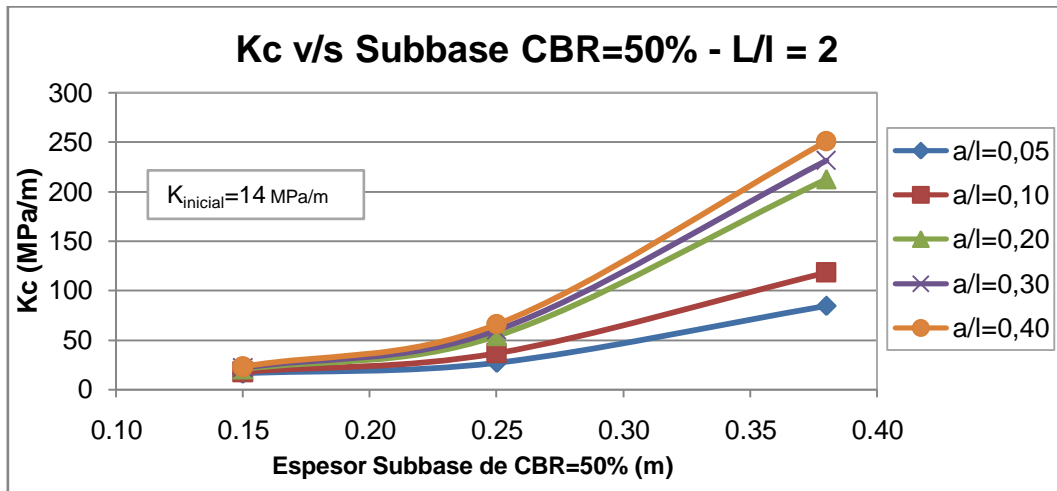


Figura 4.13 Efecto de subbase (CBR=50%) en el soporte de la subrasante K, para " L/l "=2, Carga Interior

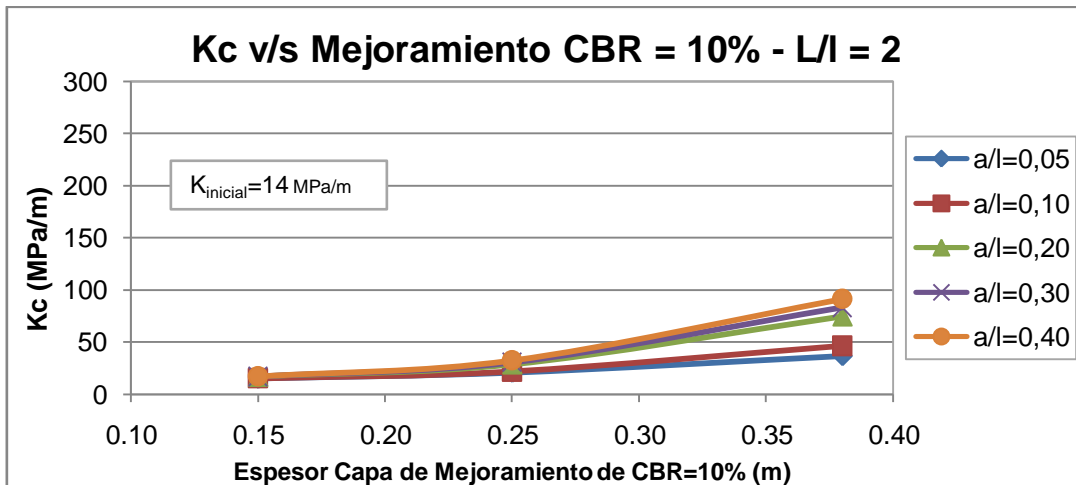


Figura 4.14 Efecto de mejoramiento (CBR=10%) en el soporte de la subrasante K, para " L/l "=2, Carga Interior

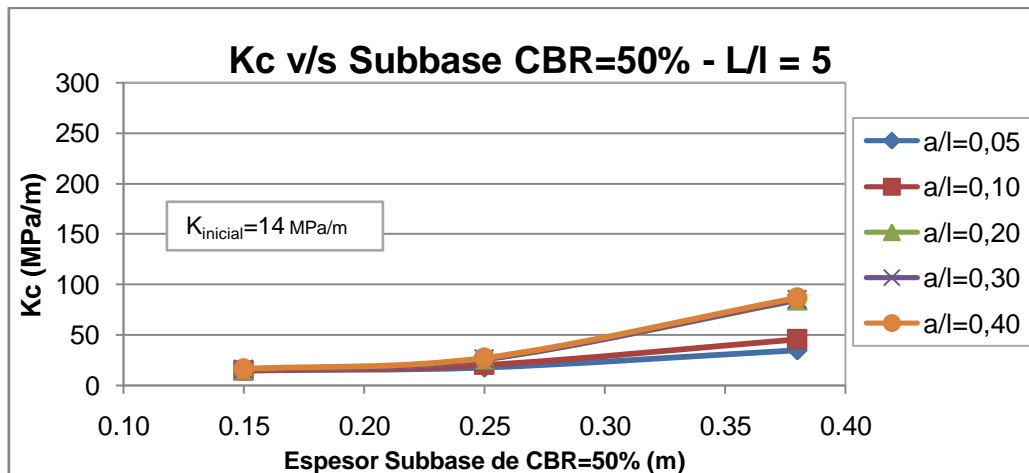


Figura 4.15 Efecto de subbase (CBR=50%) en el soporte de la subrasante K, para “L/l”=5, Carga Interior

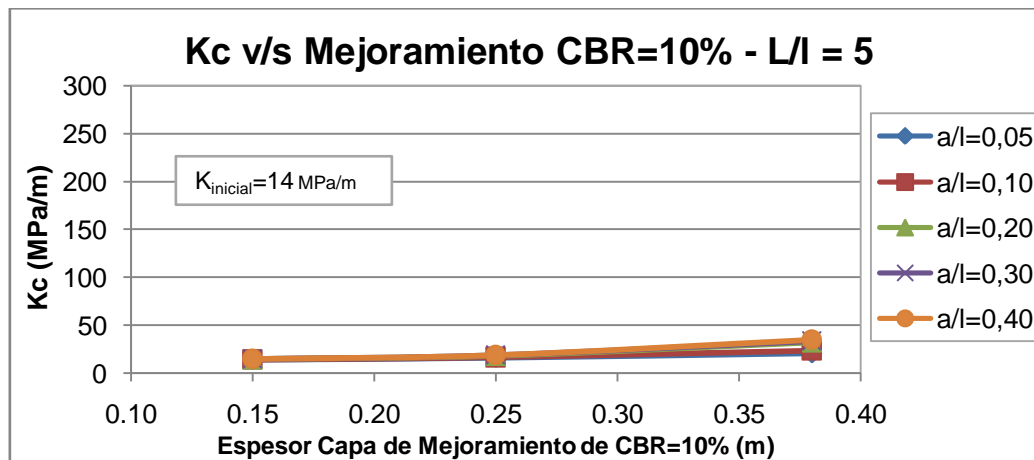


Figura 4.16 Efecto de mejoramiento (CBR=10%) en el soporte de la subrasante K, para “L/l”=5, Carga Interior

De los gráficos, se puede apreciar, con claridad, que los valores de K compuesto para “L/l”=2, en ambas capas de apoyo, están sobre estimados, debido a que el valor de Kc no puede ser mayor que el valor de K, que representa cada material. La subbase de CBR=50% representa un valor de K de 108 [MPa/m], mientras que, la capa de mejoramiento de CBR=10% significa un K de 60 [MPa/m]. Para los casos de “L/l”=5, si bien, no ocurre una sobre estimación tan exagerada como en el caso anterior, las tendencias de las curvas indican que, a partir de espesores mayores a 40 cm, los valores de Kc serán ilógicos.

4.2.3.2- Efecto de una capa granular en el valor de K en función del comportamiento de deflexión

De acuerdo a lo presentado en el acápite 4.2.3, se realiza el cálculo del módulo de reacción compuesto, K_c , en función de los esfuerzos de deflexión obtenidos en 4.2.2.

La representación gráfica del valor de K_c según el material y espesor de la capa de apoyo, en función de los parámetros adimensionales " a/l " y " L/l ", se muestra en las siguientes figuras. (K inicial 14 MPa/m)

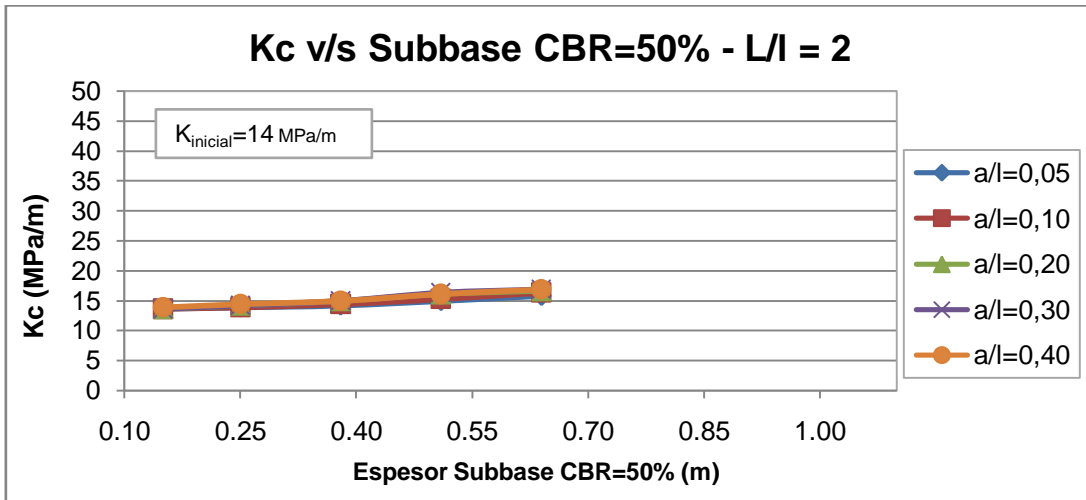


Figura 4.17 Efecto de subbase (CBR=50%) en el soporte de la subrasante K, para " L/l "=2, Carga Interior

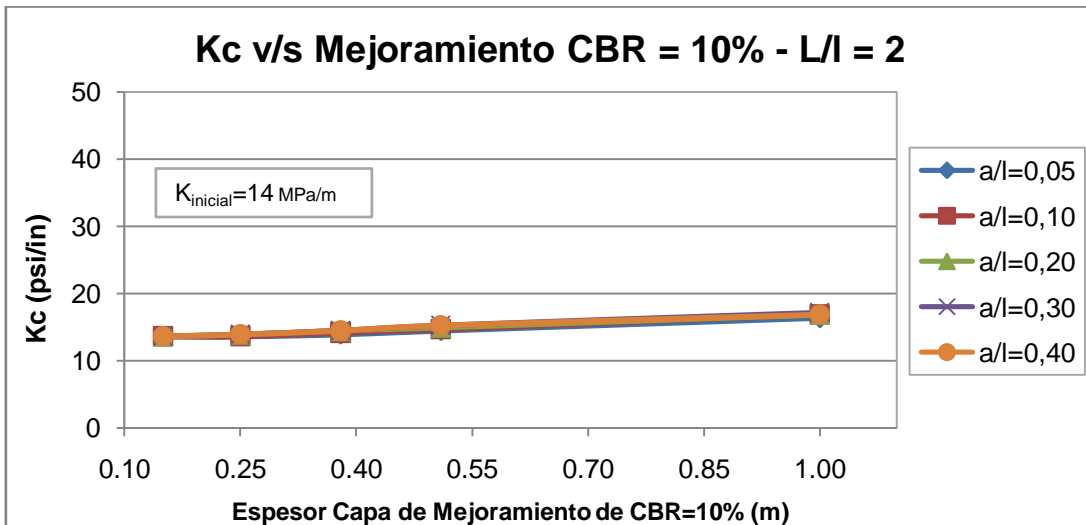


Figura 4.18 Efecto de mejoramiento (CBR=10%) en el soporte de la subrasante K, para " L/l "=2, Carga Interior

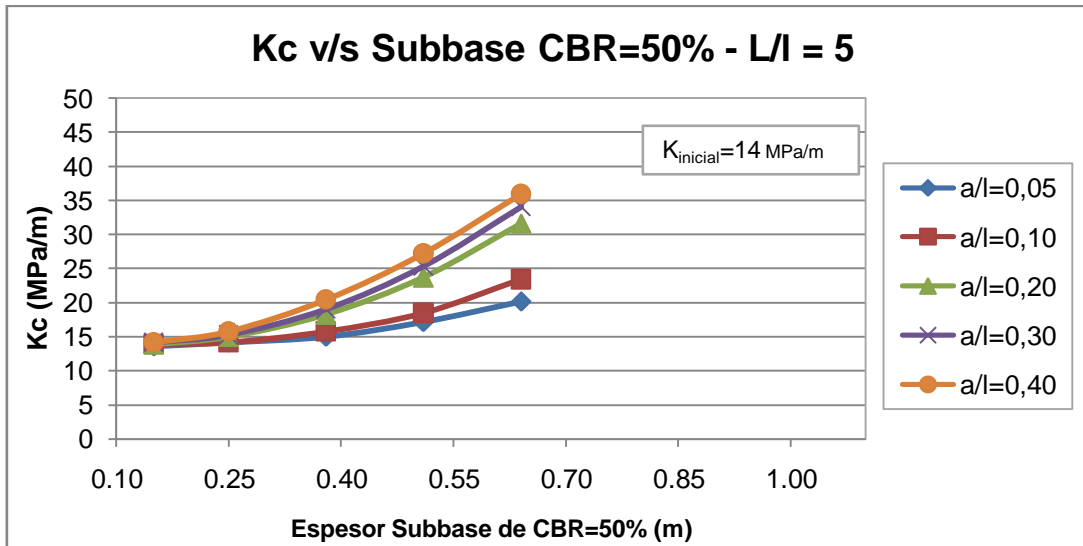


Figura 4.19 Efecto de subbase (CBR=50%) en el soporte de la subrasante K, para “L/l”=5, Carga Interior

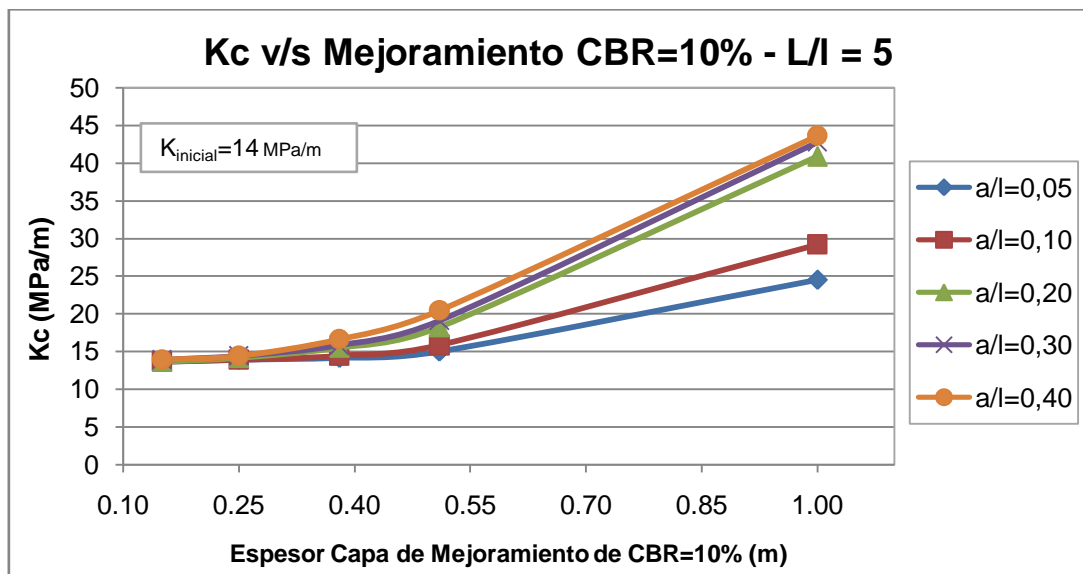


Figura 4.20 Efecto de mejoramiento (CBR=10%) en el soporte de la subrasante K, para “L/l”=5, Carga interior

Las figuras presentadas demuestran que, para ningún caso, el valor de K_c supera al valor de K correspondiente a cada capa granular, siendo esta apreciación lo lógico. Además, claro está, que a mayor espesor de la capa intermedia, mayor es la capacidad de soporte entregada a un suelo de fundación, el cual se refleja en las curvas de K_c .

Por otra parte, para los casos de “L/l”=2, los K_c resultantes por ambos materiales de apoyo, son muy semejantes y con valores muy cercanos al K inicial. Asimismo, la tendencia de la curva hacia un valor constante, es acertada. Por lo demás, no se encuentran diferencias en los valores de K_c para los diferentes valores de “a/l”.

Los gráficos del caso " $L/l=5$ ", muestran que los valores de K_c son mayores respecto a los del caso " $L/l=2$ ". Esta tendencia se debe a que las deflexiones del caso " $L/l=5$ " son menores, por ende el efecto de las capas granulares tiene un mayor efecto en K . En otra apreciación, se apunta que, los valores de K_c de ambas capas de apoyos son muy similares para espesores menores a 25 cm, sin embargo, para espesores mayores a 25 cm, comienzan a existir diferencias en los valores de K_c , el cual la brecha aumenta, a medida que el espesor de las capas granulares crece. Además, se logra visualizar que a mayor relación de " a/l ", superior será el valor del módulo de reacción compuesto.

Según los análisis presentados en 4.2.3.1 y 4.2.3.2, se concluye que, la forma adecuada de representar el efecto aportante de soporte de una capa granular a un suelo de subrasante de baja capacidad de soporte, es a partir del comportamiento de deflexión. Dicha teoría no sorprende, ya que el método de ensayo de placa de carga, para la obtención de K , resulta a partir de mediciones de deflexión. Debido a esta condicionante, los análisis siguientes para la estimación del K_c , se realizarán sólo en función del comportamiento de deflexión.

Paralelamente a estos análisis, se realizó una comparación de estas curvas con otro programa, BISAR. Programa computacional basado en la teoría de multicapas (método Shell), cuyo método considera la estructura de pavimento, como un sistema multicapa linealmente elástico ante las sollicitaciones actuantes sobre la estructura. En este método, los materiales se caracterizan por el módulo elástico (E) y razón de Poisson (μ). Además los materiales de la estructura, se consideran homogéneos y se asume que las capas tienen una extensión infinita en sentido horizontal. Cabe mencionar, que BISAR fue elaborado para el Manual de Diseño de Pavimentos de Shell, para el cálculo de tensiones y deformaciones de las capas de un pavimento (B.V., Shell International Oil Products, 1998).

Para estimar el valor de K_c con un análisis de multicapas, se practica el mismo ejercicio ya mostrado, pero sólo para los casos de " $L/l=5$ ", debido a que BISAR considera capas de pavimento infinitas en el plano, por ende la comparación debe realizarse para los casos de mayor dimensión de losa. Dada las características de BISAR, sólo es válida la comparación para la condición de carga Interior. Además, se debe tener en cuenta que los resultados otorgados por BISAR serán, en términos de módulo de elasticidad. Por ello, para lograr la comparación de los K_c obtenidos con ISLAB2000. Los resultados de BISAR se correlacionarán, según las ecuaciones 2.1, 3.2 y 3.3, para convertir de módulo de elasticidad a módulo de reacción.

A continuación, se presentan las estimaciones de K_c mediante el método Shell para cada capa granular y en función del parámetro adimensional " a/l ", ($E_{\text{subr}} = 29 \text{ Mpa} \cong K \text{ inicial} = 14 \text{ Mpa/m}$).

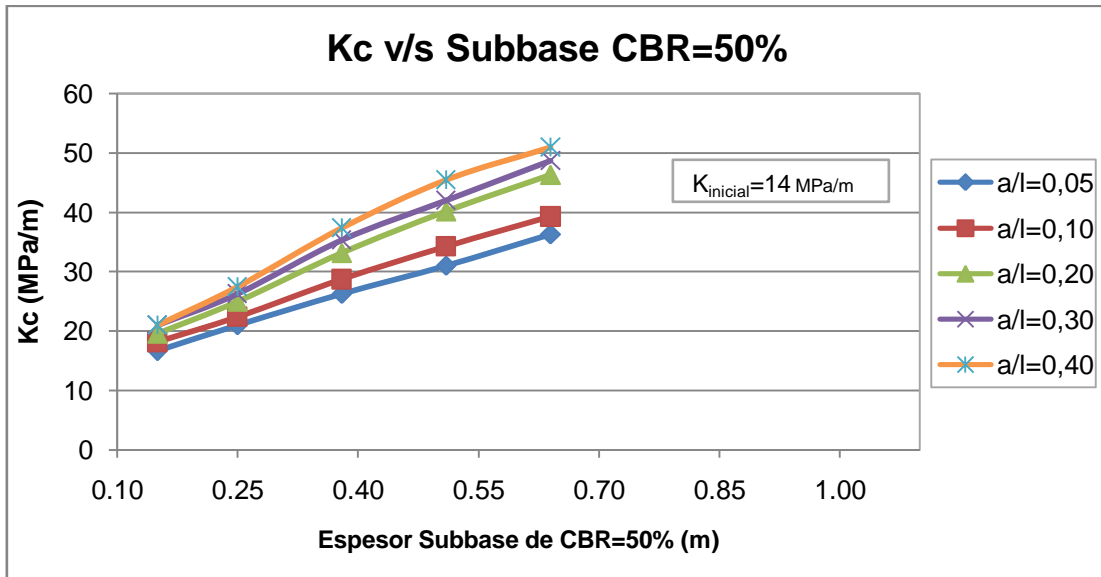


Figura 4.21 Efecto de subbase (CBR=50%) en el soporte de la subrasante K, utilizando BISAR

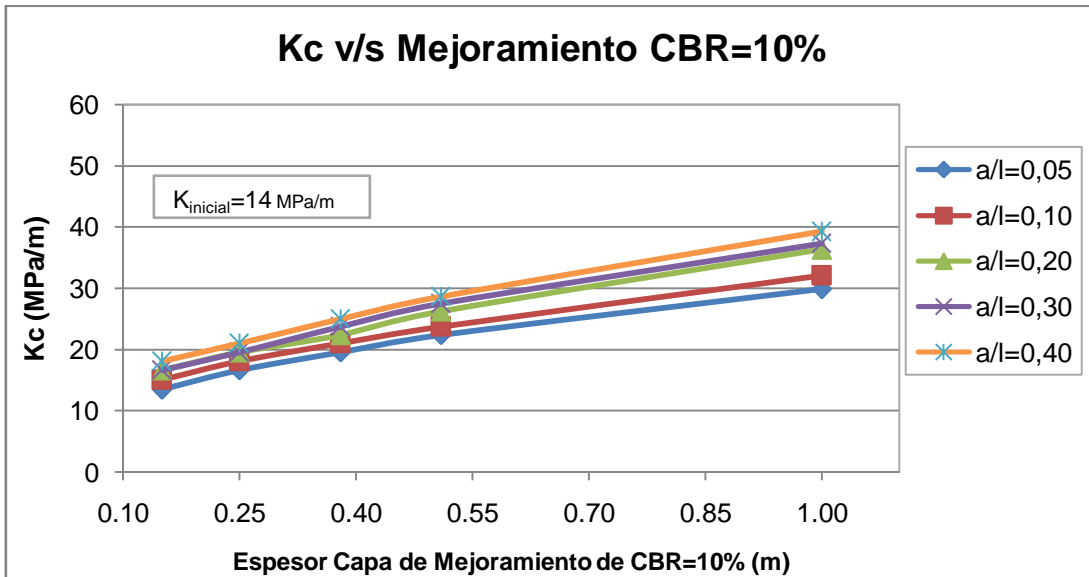


Figura 4.22 Efecto de mejoramiento (CBR=10%) en el soporte de la subrasante K, utilizando BISAR

Los gráficos obtenidos con BISAR, poseen una tendencia de curva mejor lograda que las obtenidas con ISLAB2000, ya que para espesores de capas de apoyo “infinitos” o muy altos, el valor de Kc debiera tender al valor de K correspondiente a la capa granular y en ningún caso superarlo. Por otra parte, la diferencia de Kc, para una capa granular y otra, no logra ser tan significativa, como lo son sus características de resistencia. Sin embargo, a medida que los espesores de las capas aumenten, las diferencias de Kc serán más notorias. Fenómeno que se repite en los resultados de Kc obtenidos con ISLAB2000.

Para un análisis comparativo de los K_c obtenidos con ISLAB2000 y BISAR, las Figuras 4.23 y 4.24, presentan la comparación gráfica de los valores de K_c logrados por ambos programas. La Figura 4.23 exhibe las estimaciones de K_c para una subbase de CBR=50%, mientras que la Figura 4.24, presenta los resultados de K_c , para el efecto de una capa de mejoramiento en el valor de K de un suelo de subrasante de baja capacidad de soporte (CBR<3%). La comparación se realiza para los valores extremos del parámetro adimensional " a/l ", es decir, {0,05 y 0,40}, para así abarcar todo espectro de valores de K_c estimados en este estudio.

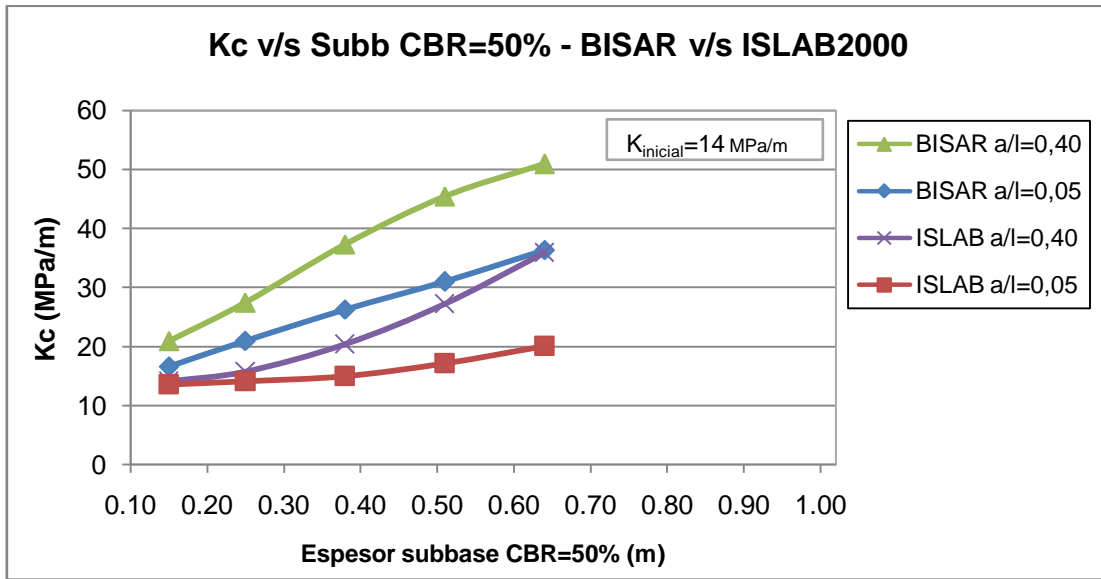


Figura 4.23 Gráfica comparativa de valores de K_c obtenidos con ISLAB2000 y BISAR a partir de una subbase de CBR=50%

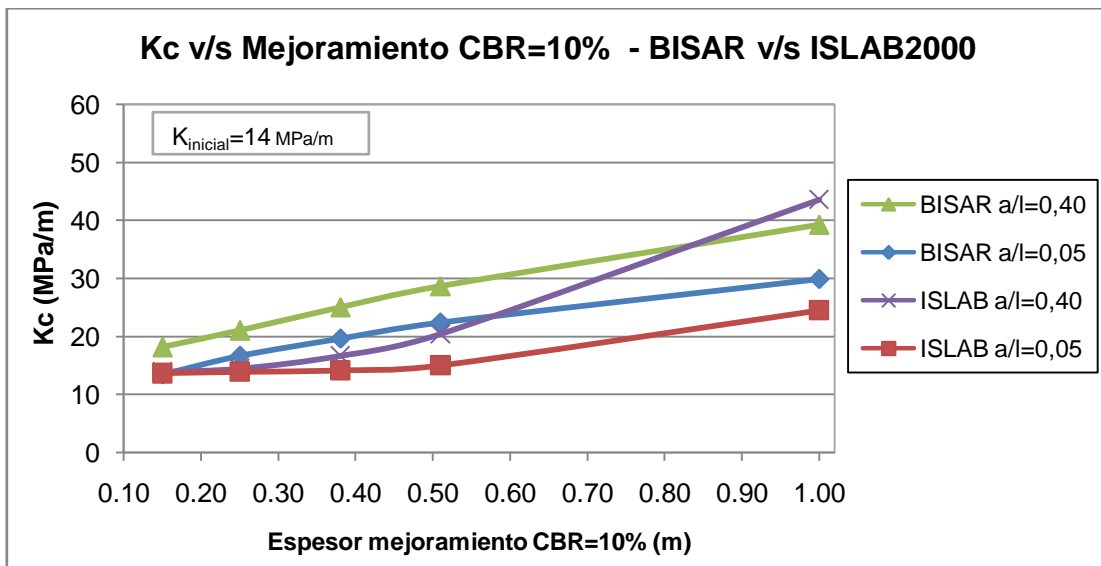


Figura 4.24 Gráfica comparativa de valores de K_c obtenidos con ISLAB2000 y BISAR a partir de un mejoramiento de CBR=10%

Las figuras muestran que los K_c estimados con ISLAB2000, son menores a los obtenidos con BISAR. Sólo en la curva "ISLAB $a/l=0,40$ ", y para espesores de mejoramiento mayores a 55 cm, los valores de K_c , superan a las estimaciones realizadas con BISAR. Sin embargo, las curvas de tendencias de los resultados con BISAR son más acertadas.

La diferencia de valores se debe, a que los programas se basan en teorías completamente diferentes. Con ISLAB2000 se consideró la teoría de las placas con un modelo de suelo de fundación de Winkler, mientras que BISAR se rige por el método de multicapas y según el modelo de fundación Sólido Elástico (ES). A raíz de esto, y según las características de cada método, se puede explicar la diferencia de valores:

Las deflexiones que se obtienen en una fundación Sólido Elástico (ES) son de carácter global, mientras que con el modelo de Winkler son localizadas, es decir, se producen sólo donde es aplicada la carga. Por consecuencia, la fundación de ES genera un cuenco de deflexión mucho mayor. Sin embargo, la deflexión medida en un mismo punto, será superior en un modelo de Winkler. A partir de esto, las deflexiones entregadas por ISLAB2000, confirmando lo planteado, son mayores a las de BISAR, lo que genera que el aporte de la capa granular a un suelo de subrasante, sea menor que la capa analizada con el método de multicapas. Además se debe tener en consideración que el método de obtención K_c , a partir de BISAR, consisten en capas infinitas en el plano horizontal, mientras que en ISLAB2000 se consideraron largos de losas de dimensión finita dados por el parámetro adimensional " L/l "=5.

Los valores del parámetro K_c , se expondrán en el ANEXO A.

4.3- Condición de Carga de Borde

Esta condición se refiere a la carga ubicada en el centro del borde longitudinal de la losa, generando tensión y deflexión máxima en el borde de la losa de hormigón.

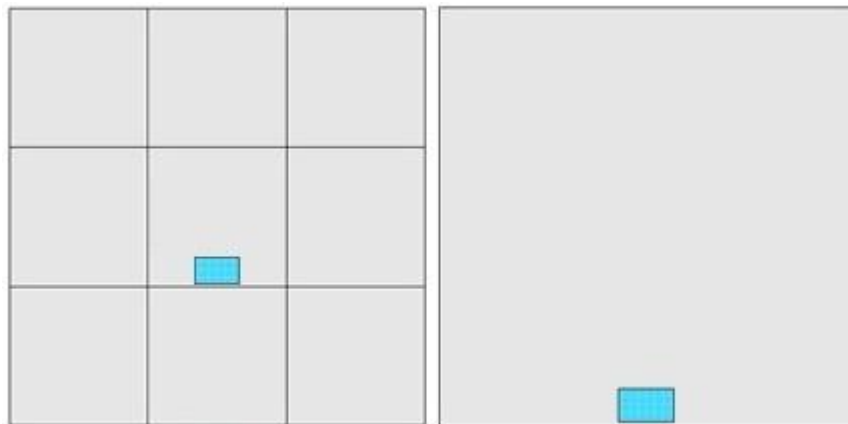


Figura 4.25 Configuración de carga de Borde para " L/l "=2 y " L/l "=5, respectivamente

4.3.1- Análisis de Tensión

La carga ubicada al borde de la losa genera tensión de tracción máxima en la fibra inferior de la losa, y en el punto donde es aplicada la carga.

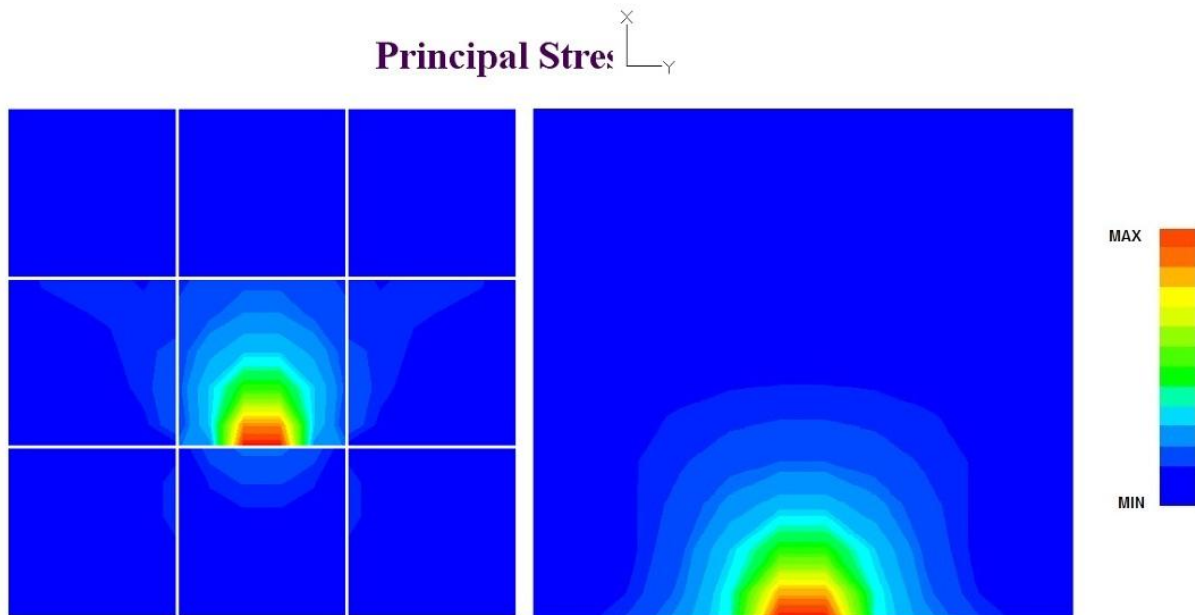


Figura 4.26 Distribución de tensión para carga de borde obtenidas con ISLAB2000 para casos “ $L/l=2$ y “ $L/l=5$, respectivamente

La ecuación de Tensión de Westergaard (Ioannides, Thompson, & Barenberg, 1985) para la condición Carga de Borde es:

$$\sigma_b = \frac{3 \cdot (1 + \mu) \cdot P}{\pi \cdot (3 + \mu) \cdot h^2} \cdot \left[\ln \left(\frac{E_h \cdot h^3}{100 \cdot k \cdot a^4} \right) + 1,84 - \frac{4 \cdot \mu}{3} + \frac{1 - \mu}{2} + 1,18 \cdot (1 + 2 \cdot \mu) \cdot \left(\frac{a}{l} \right) \right] \quad ec. 4.9$$

Donde,

$$l = \sqrt[4]{\frac{E_h \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \mu^2) \cdot k}} \quad ec. 4.3$$

$$a = \sqrt{\frac{P}{p \cdot \pi}} \quad ec. 4.4$$

σ_b = Tensión de tracción máxima en la fibra inferior de la losa

μ = Razón de Poisson del hormigón

P = Carga aplicada

h = Espesor de la losa
 l = Radio de rigidez relativa losa-suelo fundación
 E_h = Módulo de elasticidad del hormigón
 k = Módulo de reacción de la subrasante
 a = Radio del área de carga
 p = Presión de inflado de neumático

La forma funcional adimensional de la tensión en la losa para esta condición de carga, está dada por la expresión 4.1:

$$\frac{\sigma \cdot h^2}{P} = f\left(\frac{a}{l}, \frac{L}{l}\right)$$

Donde,

σ = Tensión de tracción máxima en la fibra inferior de la losa
 h = Espesor de losa
 P = Carga aplicada
 a = Radio del área de carga
 l = Radio de rigidez relativa losa-suelo fundación
 L = Largo de la losa

Se obtienen tantos valores para la tensión, como variaciones de los parámetros " a/l ", " L/l " y espesores de subbase se realicen.

Los valores de las variables adimensionales considerados son los siguientes:

" a/l ": {0,05; 0,10; 0,20; 0,30; 0,40}

" L/l ": {2, 5}

Los espesores de las capas de apoyo consideradas son los siguientes:

Espesor de subbase (cm) : {0; 15; 25; 38; 51; 64}

Espesor de mejoramiento (cm) : {0; 15; 25; 38; 51; 100}

A continuación se presenta el comportamiento tensional en función de los parámetros adimensionales " a/l ", " L/l " y producto de una capa granular.

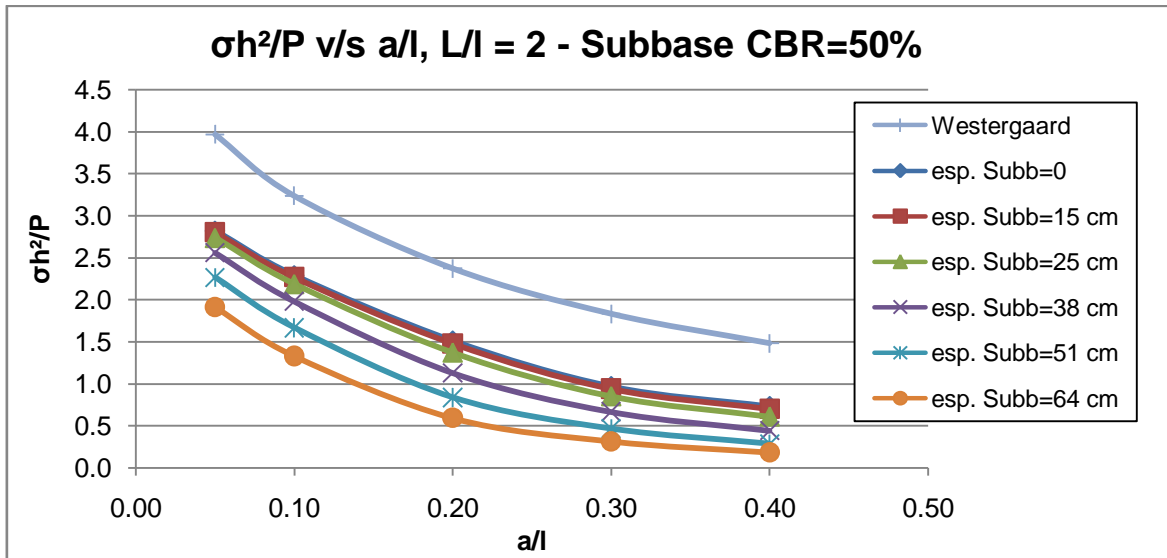


Figura 4.27 Comportamiento Tensional producto Subbase granular de CBR=50% para " L/l "=2, Carga Borde

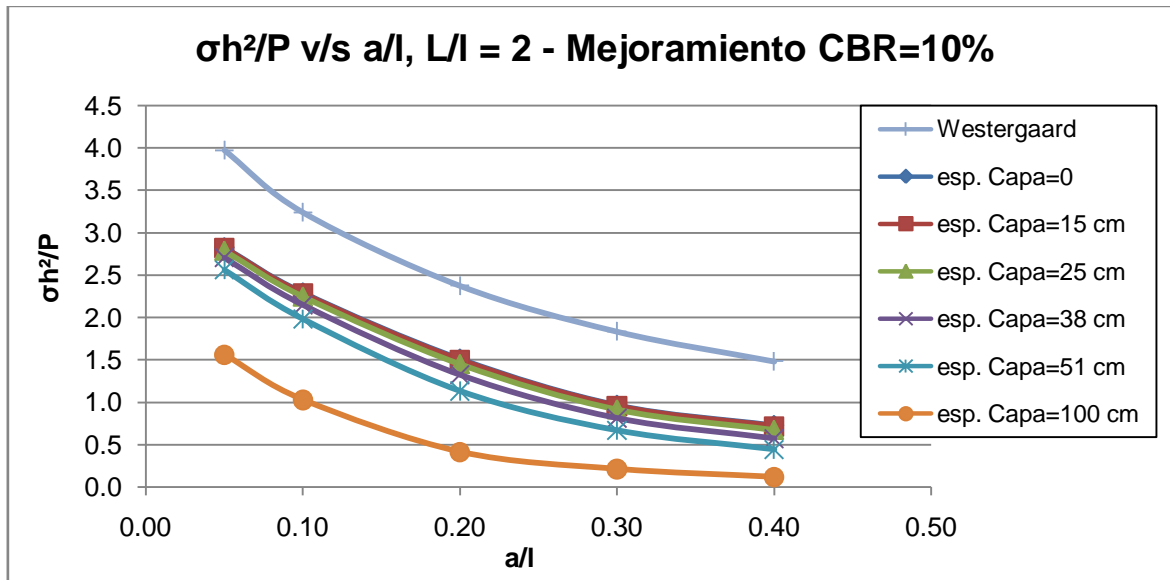


Figura 4.28 Comportamiento Tensional producto Mejoramiento de CBR=10% para " L/l "=2, Carga Borde

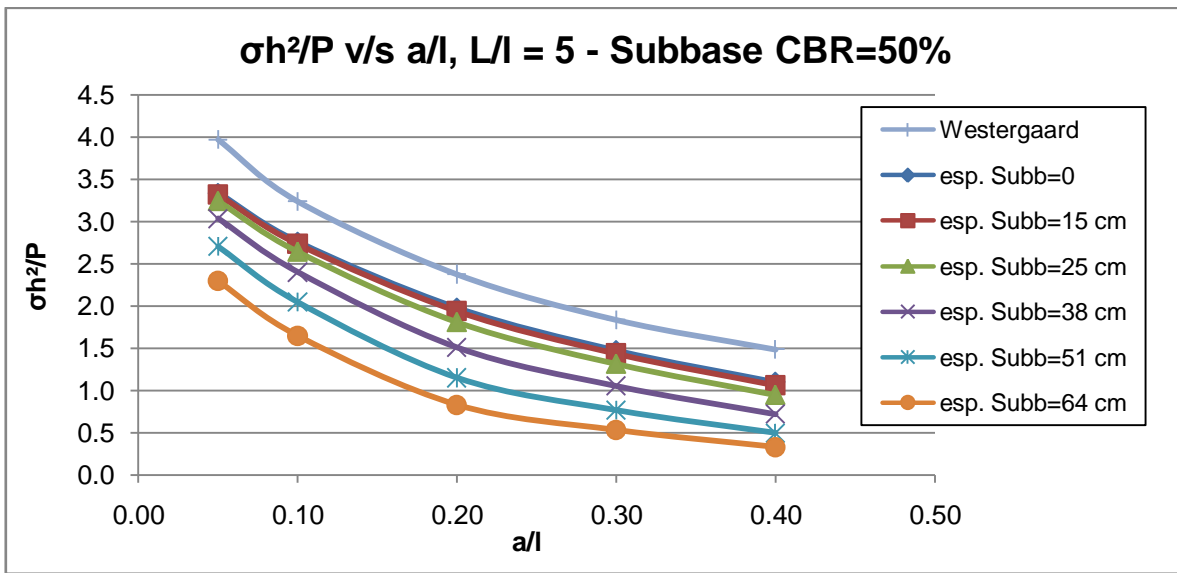


Figura 4.29 Comportamiento Tensional producto Subbase granular de CBR=50% para “L/l”=5, Carga Borde

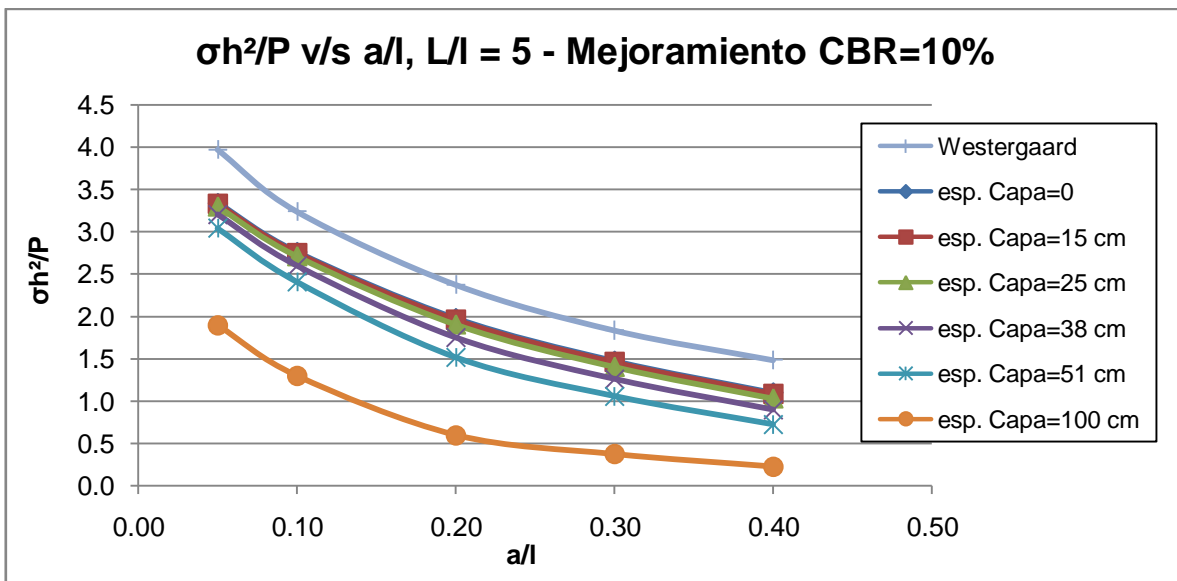


Figura 4.30 Comportamiento Tensional producto Mejoramiento de CBR=10% para “L/l”=5, Carga Borde

Los gráficos confirman que la condición de carga de borde es más crítica que la carga interior, debido a que las tensiones generadas en la losa son mayores. Por otra parte, las subbases granulares empiezan a tener un efecto significativo, en la losa, a partir de espesores mayores a las 25 cm. La diferencia tensional con la presencia de una subbase y la otra, es despreciable. Sólo se observan mayores diferencias cuando los espesores son mayores a 25 cm. Además, el comportamiento entre los “L/l” es la misma que para el caso de carga interior.

4.3.2- Análisis de Deflexión

Para esta condición, la deflexión máxima ocurre en el punto exacto donde es aplicada la carga, es decir al centro del borde longitudinal de la losa.

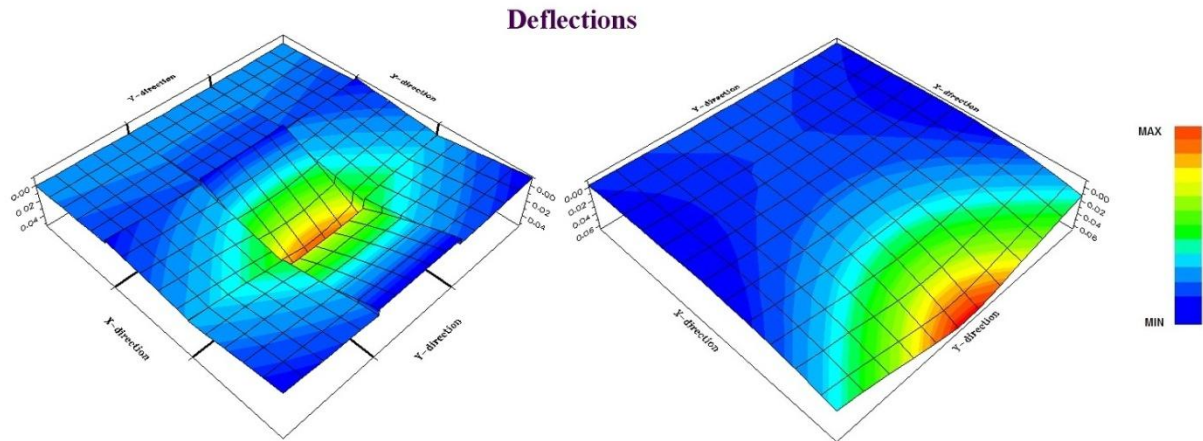


Figura 4.31 Distribución de deflexión para carga de borde obtenidas con ISLAB2000 para casos “L/l”=2 y “L/l”=5, respectivamente

La ecuación de Deflexión de Westergaard (Ioannides, Thompson, & Barenberg, 1985) para la condición carga de borde es:

$$w_b = \frac{0,431 \cdot P}{k \cdot l^2} \left[1 - 0,82 \cdot \left(\frac{a}{l} \right) \right] \quad \text{ec 4.10}$$

Donde,

w_b = Deflexión máxima al borde de la losa

k = Módulo de reacción de la subrasante

P = Carga aplicada

a = Radio del área de carga

l = Radio de rigidez relativa losa-suelo fundación

La forma funcional adimensional de la deflexión en la losa para esta condición de carga, está dada por la expresión 4.2:

$$\frac{wkl^2}{P} = f\left(\frac{a}{l}, \frac{L}{l}\right)$$

Donde,

w = Deflexión máxima de la losa

k = Módulo de reacción de la subrasante

P = Carga aplicada

a = Radio del área de carga

l = Radio de rigidez relativa losa-suelo fundación

L = Largo de la losa

Se obtienen tantos valores para la deflexión, como variaciones de los parámetros " a/l ", " L/l " y espesores de subbase se realicen.

Los valores de las variables adimensionales considerados son los siguientes:

" a/l ": {0,05; 0,10; 0,20; 0,30; 0,40}

" L/l ": {2, 5}

Los espesores de las capas de apoyo consideradas son los siguientes:

Espesor de subbase (cm) : {0; 15; 25; 38; 51; 64}

Espesor de mejoramiento (cm) : {0; 15; 25; 38; 51; 100}

A continuación se presenta el comportamiento de deflexión en función de los parámetros adimensionales " a/l ", " L/l " y producto de una capa granular.

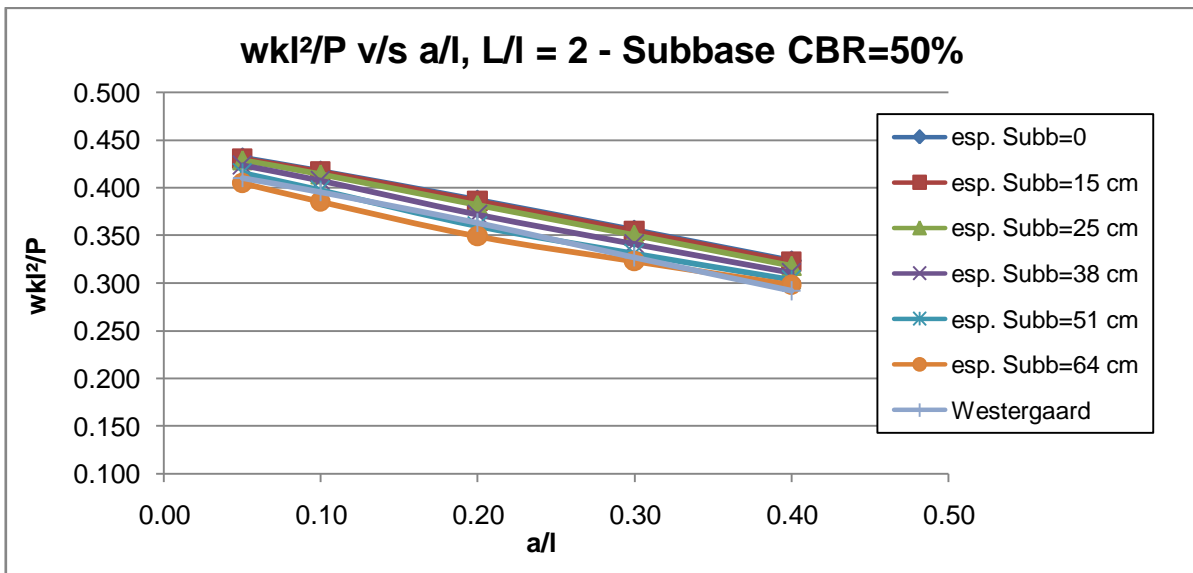


Figura 4.32 Comportamiento Deflexión producto Subbase granular de CBR=50% para “L/l”=2, Carga Borde

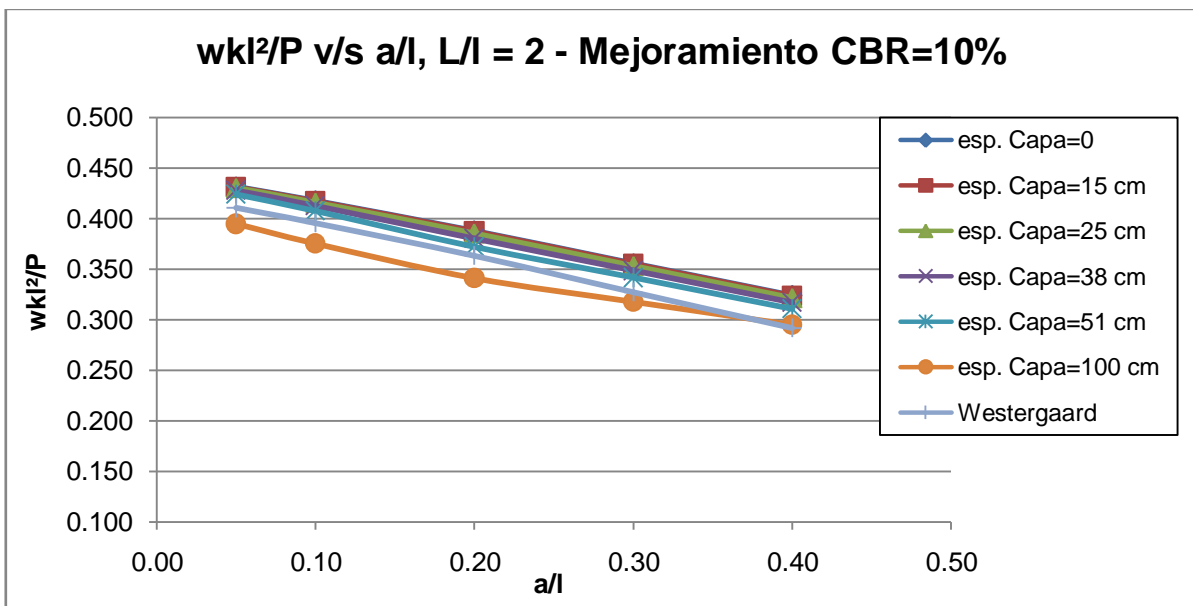


Figura 4.33 Comportamiento Deflexión producto Mejoramiento de CBR=10% para “L/l”=2, Carga Borde

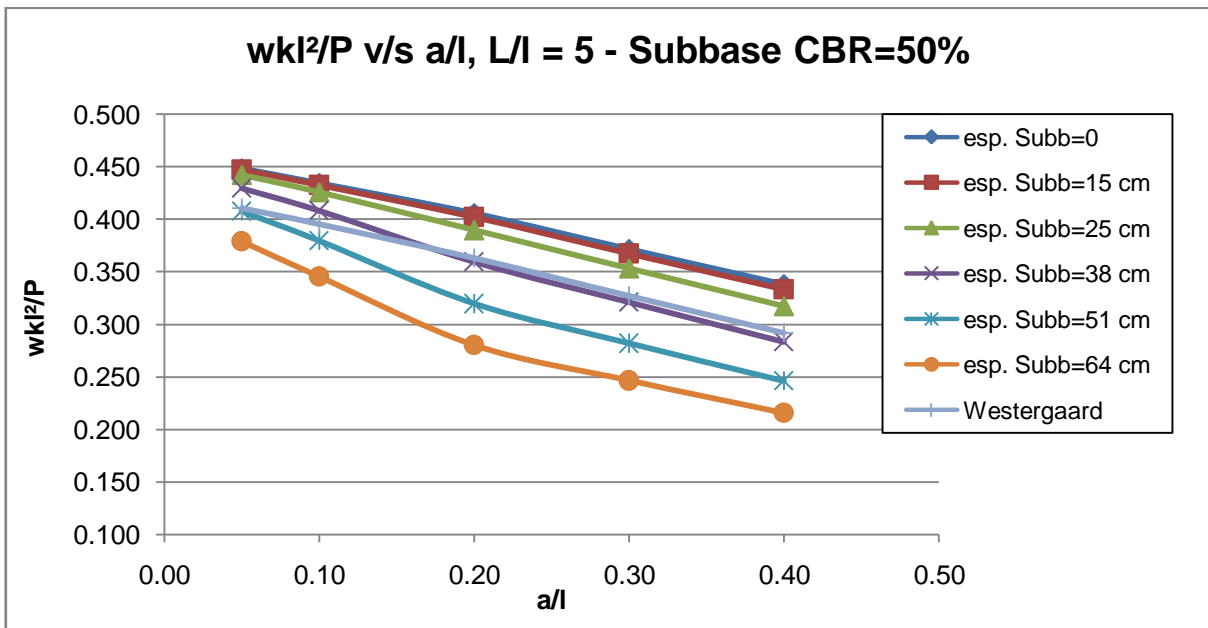


Figura 4.34 Comportamiento Deflexión producto Subbase granular de CBR=50% para “L/l”=5, Carga Borde

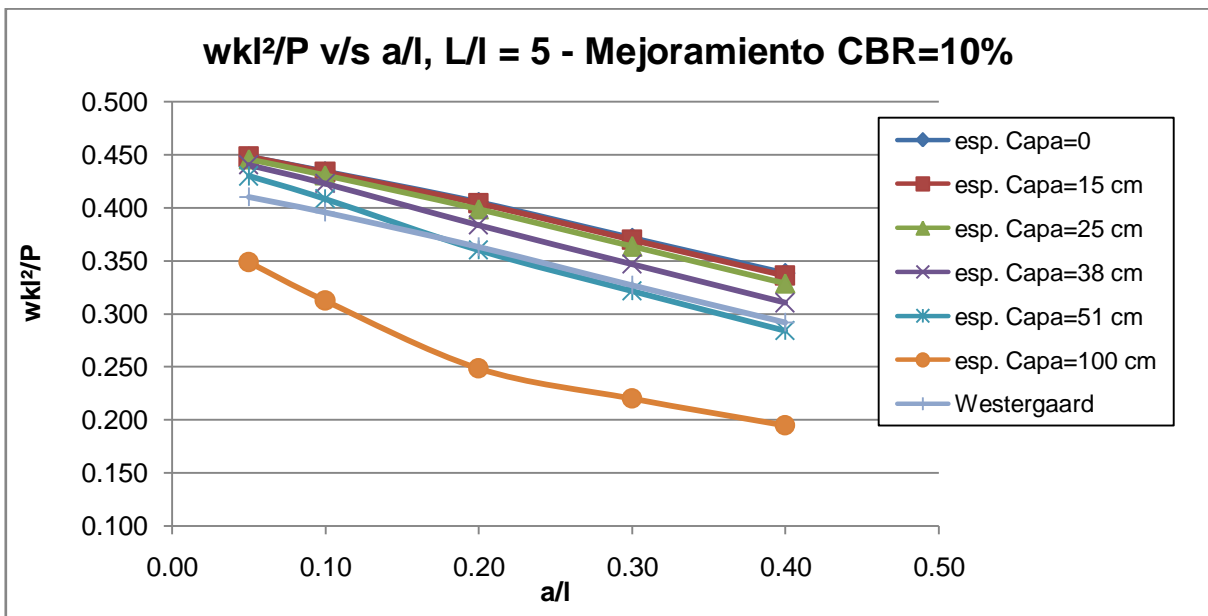


Figura 4.35 Comportamiento Deflexión producto Mejoramiento de CBR=10% para “L/l”=5, Carga Borde

Para $L/l=2$ las subbases no tienen mayor incidencia en la disminución de las deflexiones. En cambio, para $L/l=5$, a partir de subbase con espesores mayores que 25 cm, sí tiene incidencia para el suelo de CBR=50%. Así como también, tiene incidencia en la capa de mejoramiento de CBR=10% cuando el espesor es mayor a 38 cm. Además, se logra visualizar que no existen grandes diferencias de deflexión entre un suelo y otro, especialmente, para $L/l=2$. En el caso de $L/l=5$ existe un mayor grado de diferencia de deflexiones pero es mínima. La comparación entre las deflexiones entre los L/l , se puede decir que son similares, pues sólo se apunta a que existe una diferencia mayor para las deformaciones del caso $L/l=5$.

Los resultados de los esfuerzos obtenidos, ya sea con ISLAB2000 y Westergaard, para esta condición de carga, se presentará en el ANEXO B.

4.3.3- Efecto de una Capa Granular en el Módulo de Reacción de Subrasante K

A continuación se presenta el efecto de un capa granular en el valor de K en función del comportamiento de deflexión para la condición de carga de borde, según metodología descrita en 4.2.3.

4.3.3.1- Efecto de una capa granular en el valor de K en función del comportamiento de deflexión

Se realiza el cálculo del módulo de reacción compuesto, K_c , en función de los esfuerzos de deflexión obtenidos en 4.3.2.

La representación gráfica del valor de K_c según el material y espesor de la capa de apoyo, en función de los parámetros adimensionales a/l y L/l , se muestra en las siguientes figuras. (K inicial 14 MPa/m)

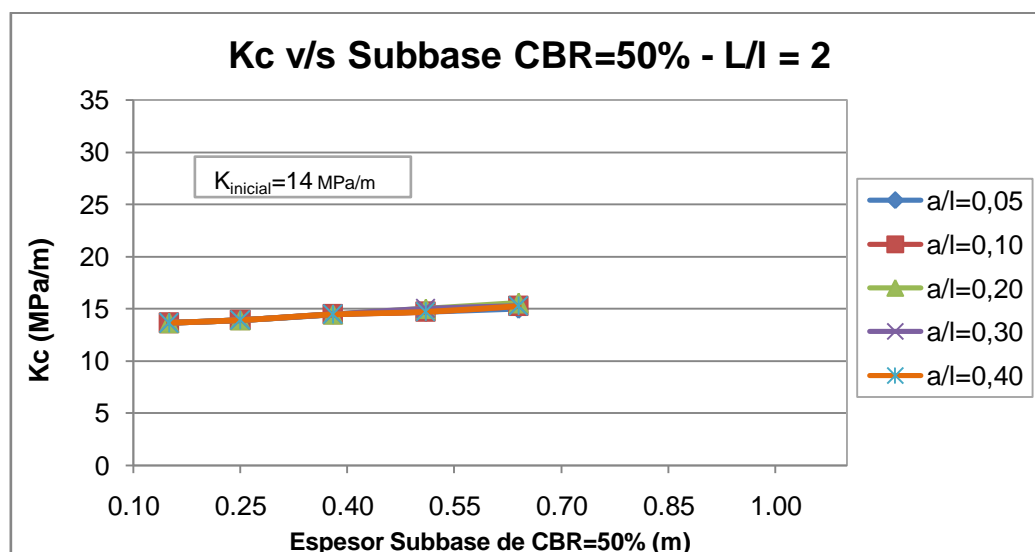


Figura 4.36 Efecto de subbase (CBR=50%) en el soporte de la subrasante K, para $L/l=2$, Carga Borde

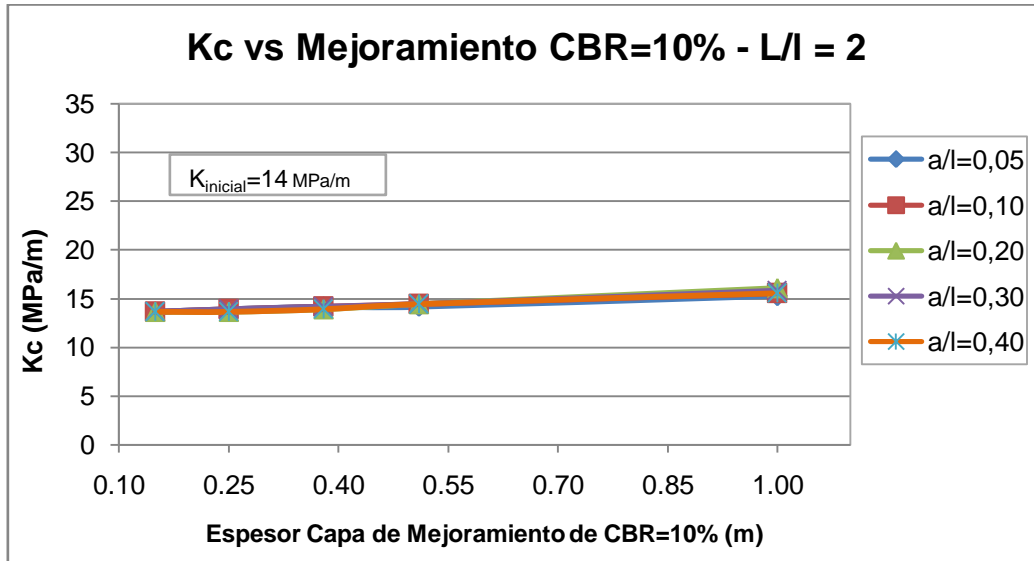


Figura 4.37 Efecto de mejoramiento (CBR=10%) en el soporte de la subrasante K, para " L/l "=2, Carga Borde

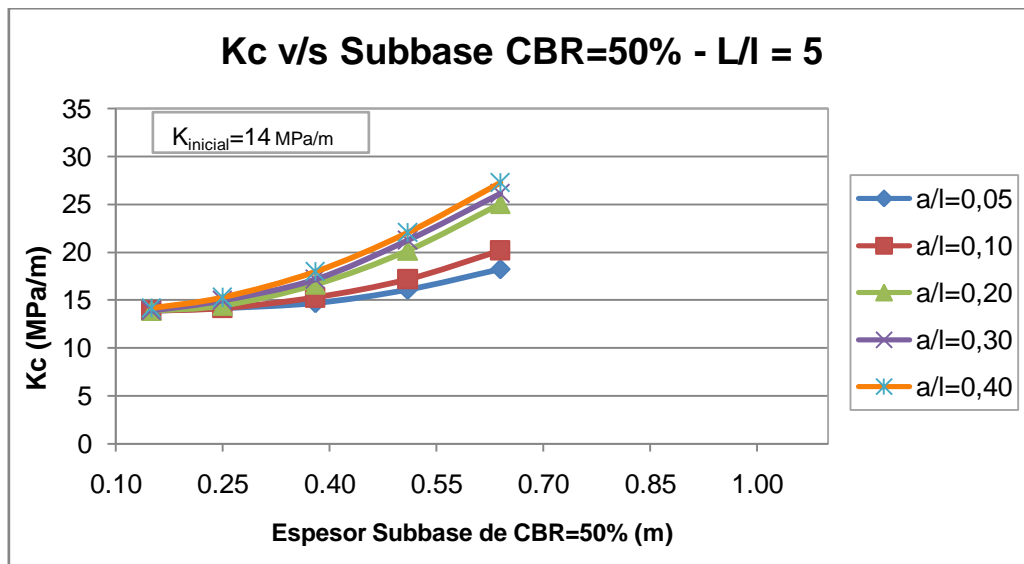


Figura 4.38 Efecto de subbase (CBR=50%) en el soporte de la subrasante K, para " L/l "=5, Carga Borde

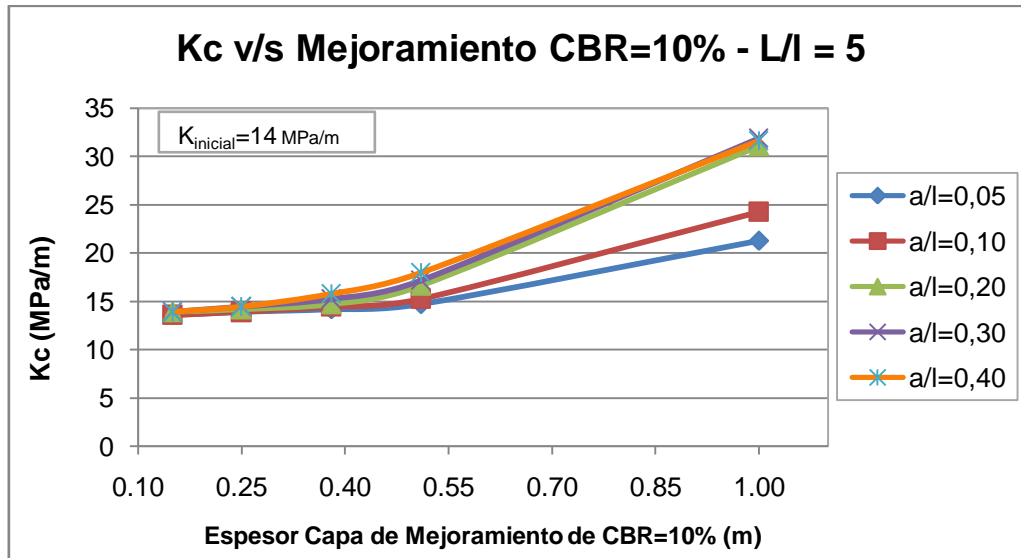


Figura 4.39 Efecto de mejoramiento (CBR=10%) en el soporte de la subrasante K, para “L/l”=5, Carga Borde

Los resultados y los comportamientos de K_c , para esta condición, son similares a los obtenidos con la condición de carga Interior. Sólo se puede apuntar que los valores de K_c , para este caso, son un tanto menores a los del caso anterior, pero siendo una diferencia casi despreciable. La razón por la cual ocurre esto, se debe a que las deflexiones producidas por una carga de borde son mayores a las de la carga interior, por ende el efecto de la capa granular se verá más afectada en el valor de K_c .

Dado el comportamiento y resultados obtenidos en este análisis, se concluye que la forma adecuada de estimar el módulo de reacción compuesto, K_c , es a partir de la condición de carga Interior y en función del comportamiento de deflexión. Como ya se ha dicho antes, el análisis se basa en la teoría de Westergaard, con lo cual, el método de estimación de K , es según al ensayo de placa de carga. Es por ello que la interpretación más cercana a un ensayo de placa de carga es la condición de carga Interior.

Los valores del parámetro, K_c , para la condición de carga de borde, se podrán encontrar en el ANEXO B.

4.4- Condición de Carga de Esquina

Esta condición se refiere a la carga ubicada en la esquina de la losa, generando tensión y deflexión máxima en la esquina de la losa de hormigón.

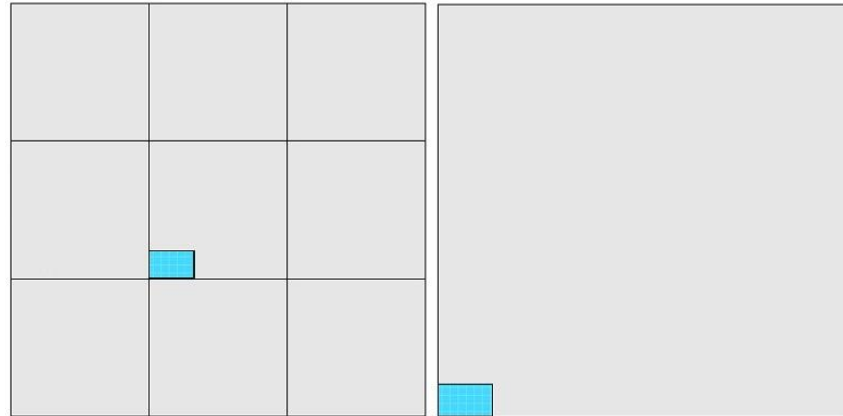


Figura 4.40 Configuración de carga de Esquina para " L/l "=2 y " L/l "=5, respectivamente

4.4.1- Análisis de Tensión

La carga ubicada en la esquina de la losa genera tensión de tracción máxima en la fibra superior de la losa, y a una distancia " x ", definida por la ecuación 4.12.

Principal Stress 

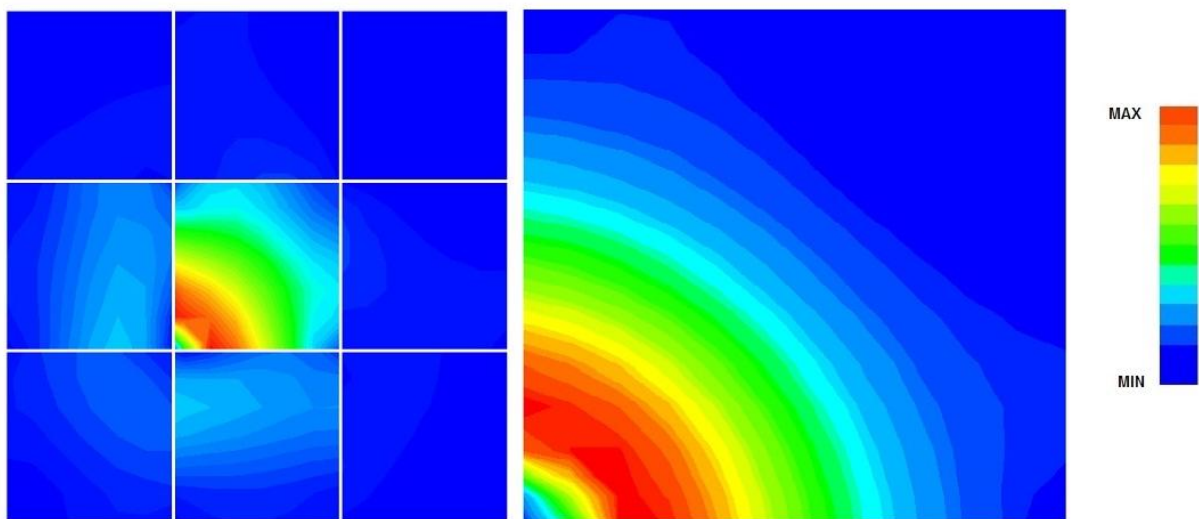


Figura 4.41 Distribución de tensión para carga de borde obtenidas con ISLAB2000 para casos " L/l "=2 y " L/l "=5, respectivamente

La ecuación de Tensión de Westergaard (Westergaard H. M., 1926) para la condición Carga de Esquina es:

$$\sigma_e = \frac{3 \cdot P}{h^2} \cdot \left(1 - \left(\frac{a \cdot \sqrt{2}}{l} \right)^{0,6} \right) \quad ec 4.11$$

$$x = 2 \cdot (a\sqrt{2} \cdot l)^{0,5} \quad ec 4.12$$

Donde,

$$l = \sqrt[4]{\frac{E_h \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \mu^2) \cdot k}} \quad ec 4.3$$

$$a = \sqrt{\frac{P}{p \cdot \pi}} \quad ec 4.4$$

σ_e = Tensión de tracción máxima en la fibra superior de la losa

μ = Razón de Poisson hormigón

P = Carga aplicada

h = Espesor de la losa

l = Radio de rigidez relativa losa-suelo fundación

x = Ubicación de la tensión máxima

E_h = Módulo de elasticidad del hormigón

k = Módulo de reacción de la subrasante

a = Radio del área de carga

p = Presión de inflado de neumático

La forma funcional adimensional de la tensión en la losa para esta condición de carga, está dada por la expresión 4.1:

$$\frac{\sigma \cdot h^2}{P} = f\left(\frac{a}{l}, \frac{L}{l}\right)$$

Donde,

σ = Tensión de tracción máxima en la fibra superior de la losa

h = Espesor de losa

P = Carga aplicada

a = Radio del área de carga

l = Radio de rigidez relativa losa-suelo fundación

L = Largo de la losa

Se obtienen tantos valores para la tensión, como variaciones de los parámetros " a/l ", " L/l " y espesores de subbases se realicen.

Los valores de las variables adimensionales considerados son los siguientes:

" a/l ": {0,05; 0,10; 0,20; 0,30; 0,40}

" L/l ": {2, 5}

Los espesores de las capas de apoyo consideradas son los siguientes:

Espesor de subbase (cm) : {0; 15; 25; 38; 51; 64}

Espesor de mejoramiento (cm) : {0; 15; 25; 38; 51; 100}

A continuación se presenta el comportamiento Tensional en función de los parámetros adimensionales " a/l ", " L/l " y producto de una capa granular.

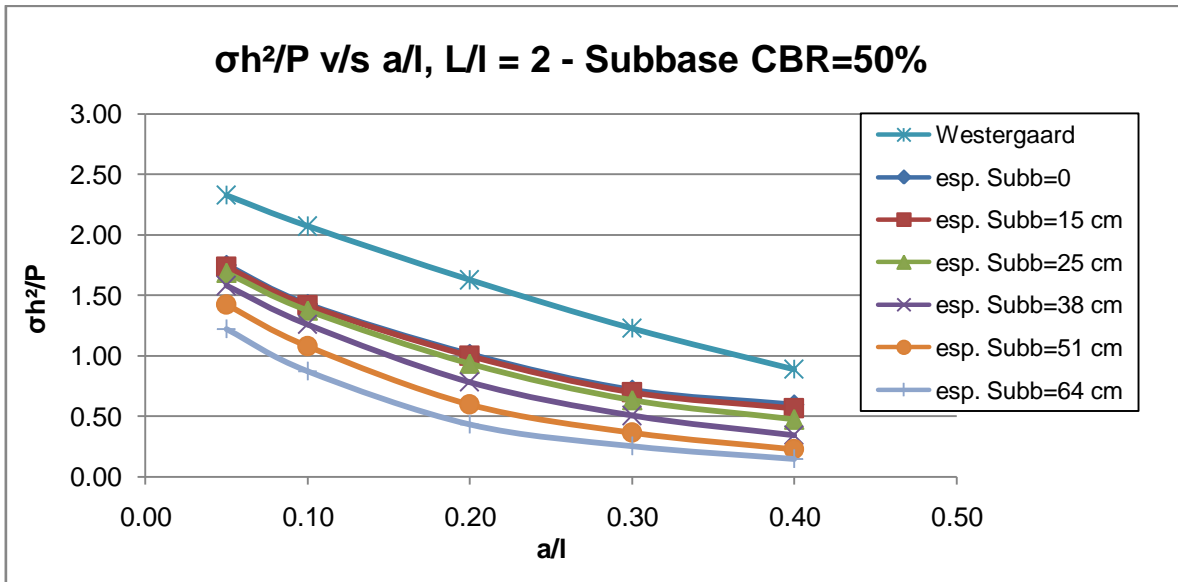


Figura 4.42 Comportamiento Tensional producto Subbase granular de CBR=50% para " L/l "=2, Carga Esquina

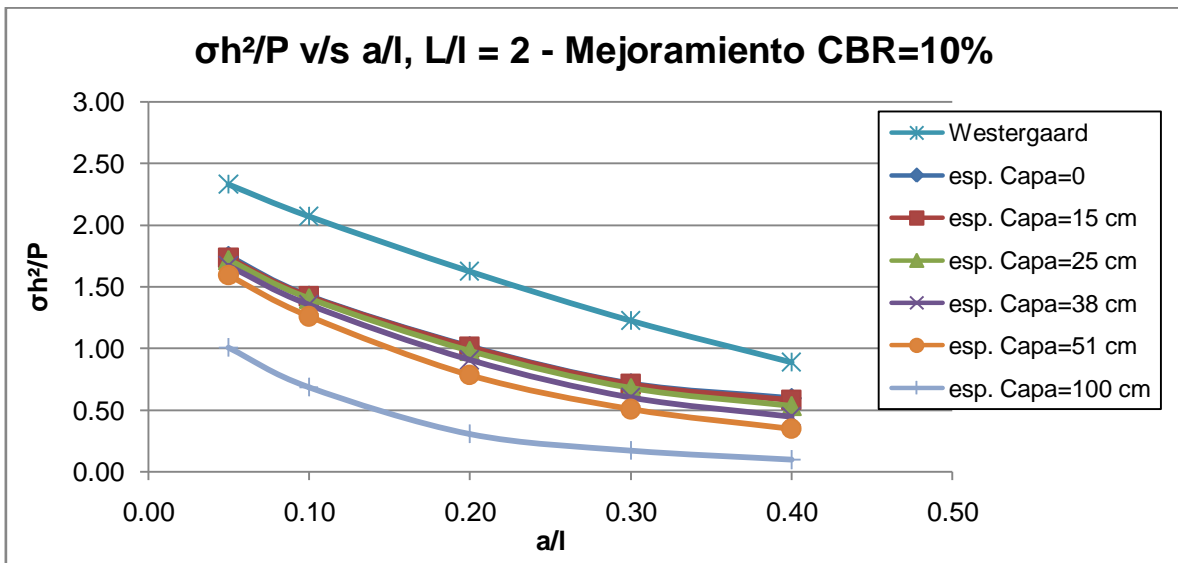


Figura 4.43 Comportamiento Tensional producto Mejoramiento de CBR=10% para " L/l "=2, Carga Esquina

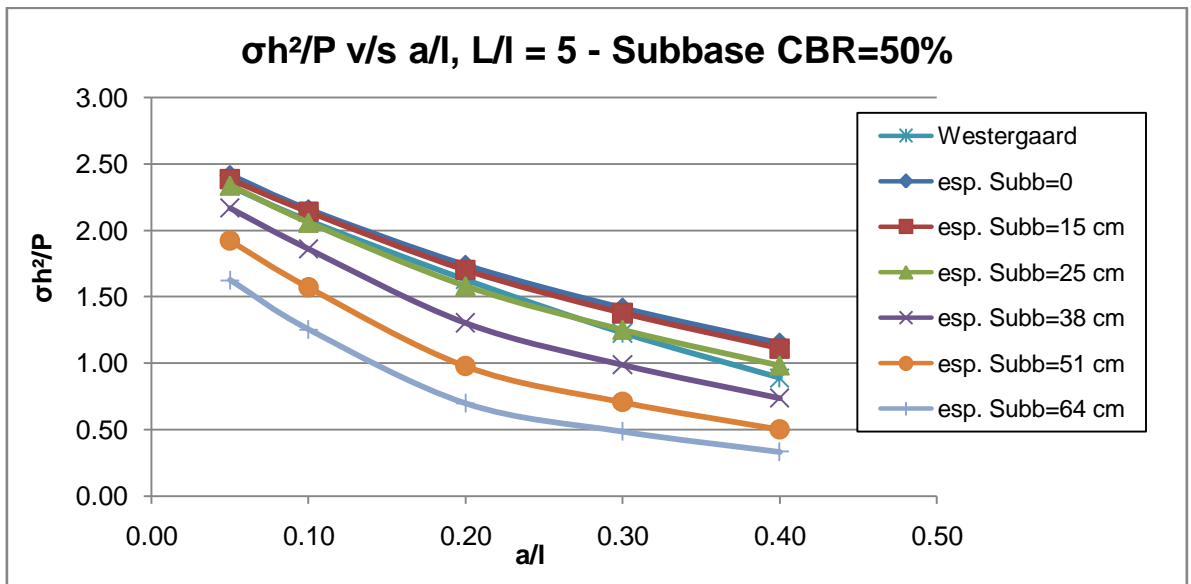


Figura 4.44 Comportamiento Tensional producto Subbase granular de CBR=50% para “L/l”=5, Carga Esquina

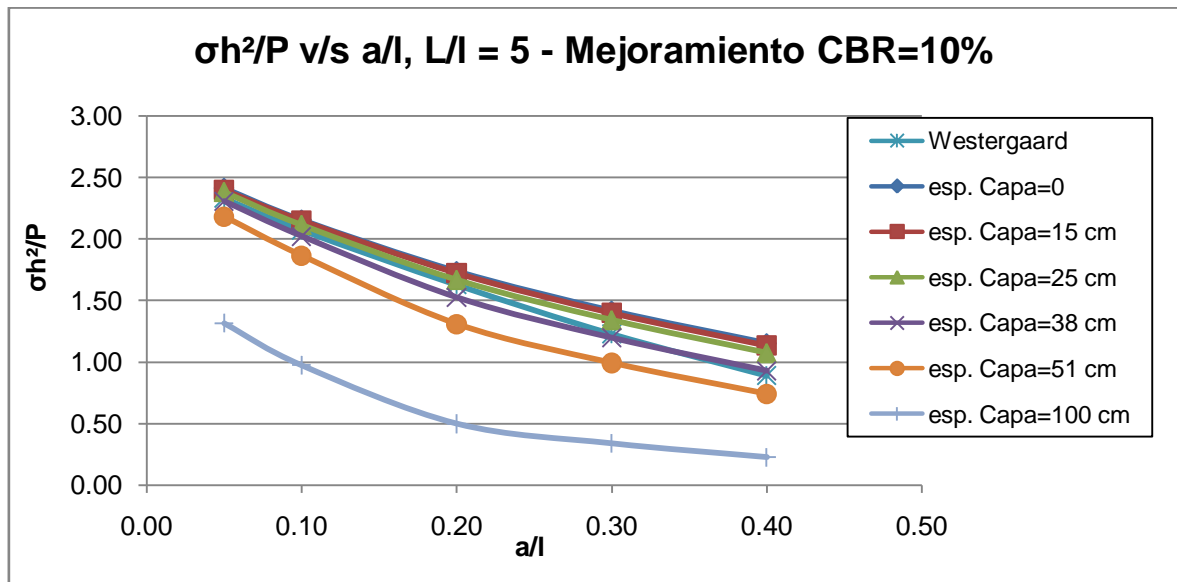


Figura 4.45 Comportamiento Tensional producto Mejoramiento de CBR=10% para “L/l”=5, Carga Esquina

Los gráficos demuestran que, el comportamiento tensional para una carga de esquina, posee la misma tendencia que para los casos de carga interior y borde. Sólo cabe mencionar, que los resultados de las tensiones dan lugar a un valor intermedio entre las condiciones de carga de borde e interior, respectivamente. Siendo la condición de carga de borde crítica, en cuanto a tensión en la losa.

4.4.2- Análisis de Deflexión

Para esta condición, la deflexión máxima ocurre en el punto exacto donde es aplicada la carga, es decir, en la esquina de la losa.

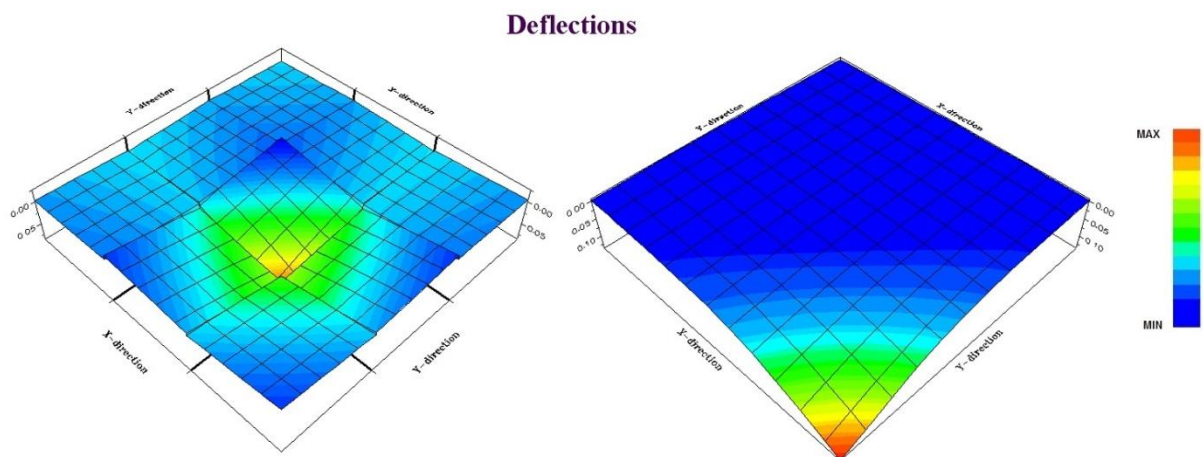


Figura 4.46 Distribución de deflexión para carga de esquina obtenidas con ISLAB2000 para casos “ $L/l=2$ ” y “ $L/l=5$ ”, respectivamente

La ecuación de Deflexión de Westergaard (Westergaard H. M., 1926) para la condición carga de esquina es:

$$w_e = \frac{P}{k \cdot l^2} \cdot \left[1,1 - 0,88 \cdot \frac{a\sqrt{2}}{l} \right] \quad \text{ec 4.13}$$

Donde,

w_e = Deflexión máxima en la esquina de la losa

k = Módulo de reacción de la subrasante

P = Carga aplicada

a = Radio del área de carga

l = Radio de rigidez relativa losa-suelo fundación

La forma funcional adimensional de la deflexión en la losa para esta condición de carga, está dada por la expresión 4.2:

$$\frac{wkl^2}{P} = f\left(\frac{a}{l}, \frac{L}{l}\right)$$

Donde,

w = Deflexión máxima de la losa

k = Módulo de reacción de la subrasante

P = Carga aplicada

a = Radio del área de carga

l = Radio de rigidez relativa losa-suelo fundación

L = Largo de la losa

Se obtienen tantos valores para la deflexión, como variaciones de los parámetros " a/l ", " L/l " y espesores de subbases se realicen.

Los valores de las variables adimensionales considerados son los siguientes:

" a/l ": {0,05; 0,10; 0,20; 0,30; 0,40}

" L/l ": {2, 5}

Los espesores de las capas de apoyo consideradas son los siguientes:

Espesor de subbase (cm) : {0; 15; 25; 38; 51; 64}

Espesor de mejoramiento (cm) : {0; 15; 25; 38; 51; 100}

A continuación se presenta el comportamiento de deflexión en función de los parámetros adimensionales " a/l ", " L/l " y producto de una capa granular.

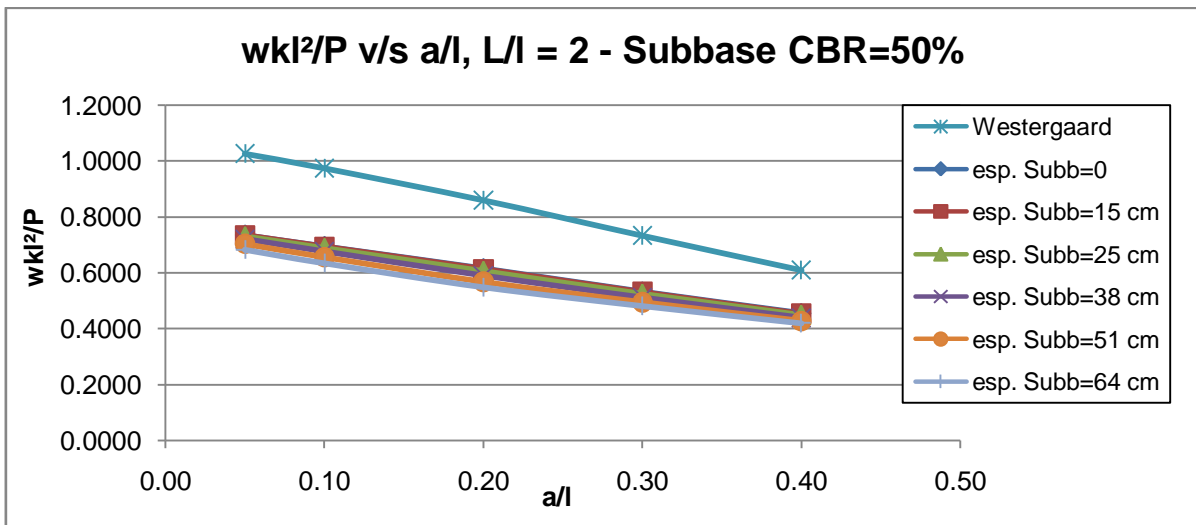


Figura 4.47 Comportamiento Deflexión producto Subbase granular de CBR=50% para "L/l"=2, Carga Esquina

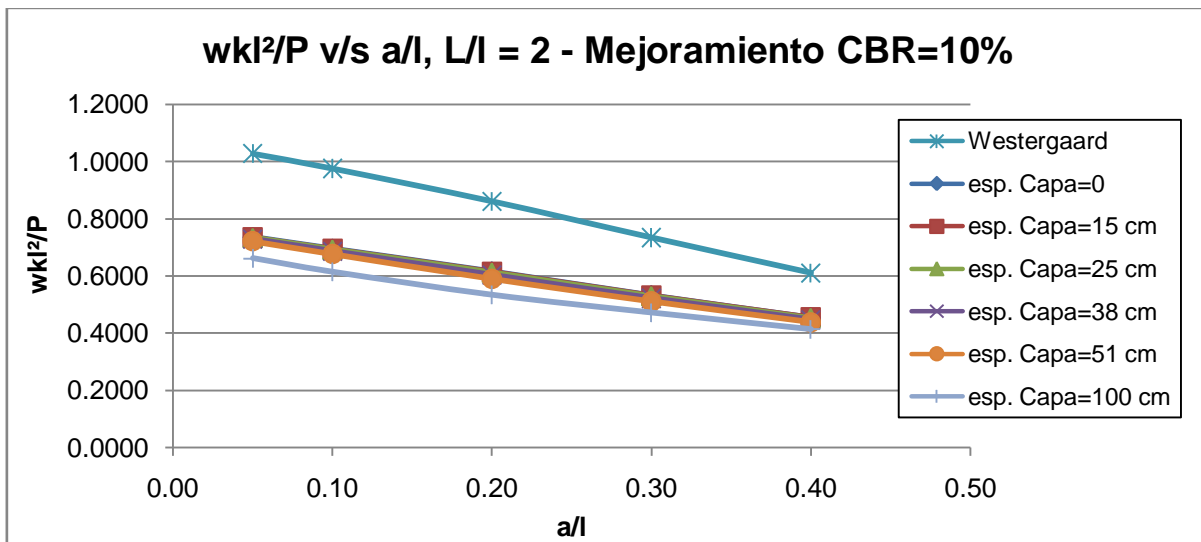


Figura 4.48 Comportamiento Deflexión producto Mejoramiento de CBR=10% para "L/l"=2, Carga Esquina

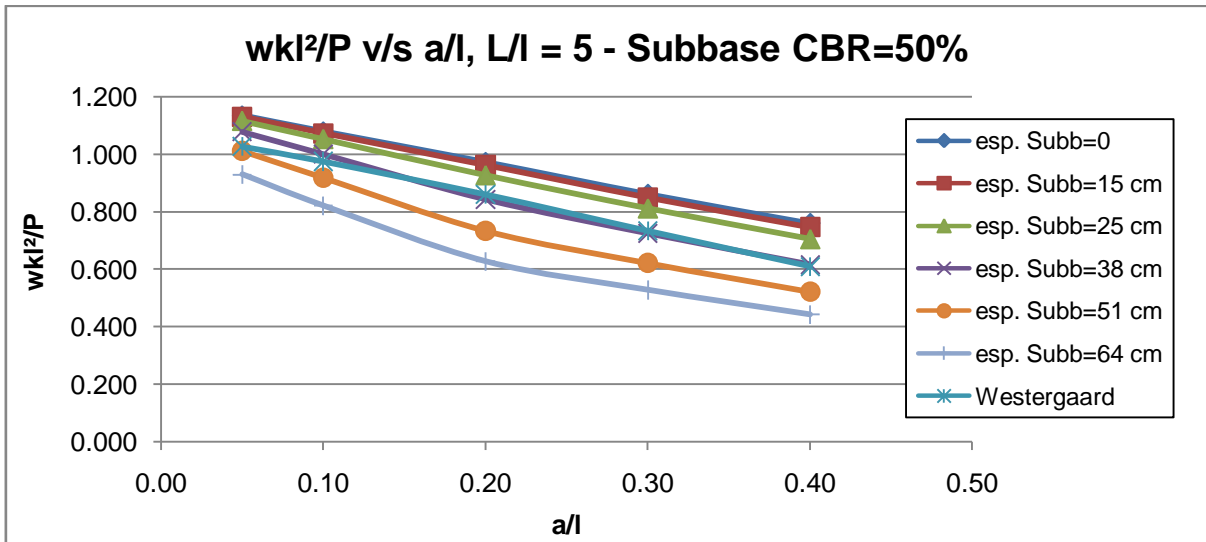


Figura 4.49 Comportamiento Deflexión producto Subbase granular de CBR=50% para “L/l”=5, Carga Esquina

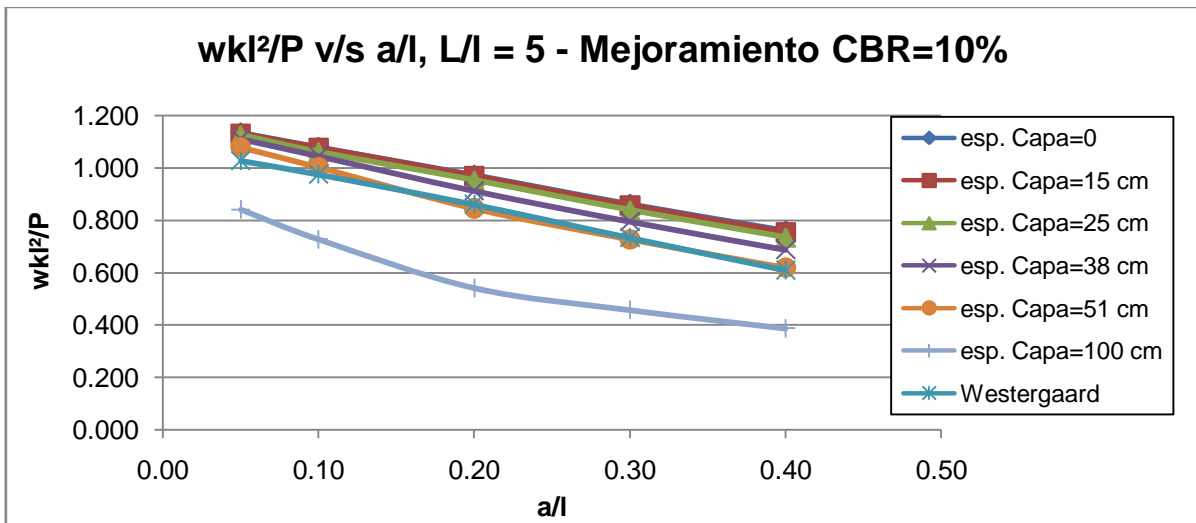


Figura 4.50 Comportamiento Deflexión producto Mejoramiento de CBR=10% para “L/l”=5, Carga Esquina

De los gráficos se aprecia que las subbases tienen mayor incidencia en los casos de “L/l”=5, es decir, para las losas de mayor dimensión, y prácticamente una nula participación cuando el largo de losa es menor. Las deflexiones de “L/l”=2 se observan que son menores que en los casos de “L/l”=5, lo cual no es lo correcto. Esto se debe a que los casos de “L/l”=2 se analizaron como un conjunto de 9 losas. Por otro lado, los gráficos confirman, que para esta condición de carga, se producen las mayores deflexiones en la losa.

Los resultados de los esfuerzos obtenidos, ya sea con ISLAB2000 y Westergaard, para esta condición de carga, se presentará en el ANEXO C.

5- ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1- Análisis de Tensión

La primera apreciación que se puede visualizar de los resultados, demuestran que las tensiones en la losa, generada por la condición de carga de borde, son mayores que para el caso de carga de esquina e interior, respectivamente, considerando la carga de borde como la condición crítica en un sistema de pavimento de hormigón.

En términos de largo de losa, en virtud del análisis, resulta que las tensiones, disminuyen a medida que el largo de losa se acorta. Por lo tanto, las losas cortas de hormigón responden de mejor manera a los esfuerzos de tensión provocados por una carga vehicular. Por otra parte, para mayor longitud de losa, los esfuerzos obtenidos de tensión máxima son los más cercanos a las respuestas de Westergaard.

Cuando el espesor de losa es muy delgado, ya sea 8 cm, las tensiones se incrementan considerablemente, es decir, cuanto menor sea el espesor de losa, mayor será la tensión en la losa. No obstante, la capa granular adquiere mayor participación, cuando estos espesores delgados existen. Además, el comportamiento de una capa granular, en la estructura de pavimento, es independiente del largo de losa, no encontrándose diferencias estructurales cuando varía el largo de la losa.

El comportamiento de una losa de hormigón, apoyada en un suelo subrasante de baja capacidad de soporte, conlleva a un incremento considerable de la tensión en la losa, y más aún, cuando el espesor de losa es muy delgado.

5.1.1- Análisis de Tensión producto una Capa Granular

Naturalmente, la tensión en la losa disminuye a medida que el espesor de una capa granular aumenta. Sin embargo, para espesores de capa de apoyo inferiores a 25 cm, el nivel de tensión es prácticamente el mismo, con o sin subbase granular o capa de mejoramiento. Además, el nivel de tensión en la losa con la presencia de una subbase de CBR=50% es inferior al de un mejoramiento de CBR=10%. Aun así, la diferencia tensional entre una capa granular y otra, logra ser significativa a partir de espesores mayores o iguales a 25 cm, por lo cual los niveles de tensión, para espesores inferiores a 25 cm, suelen ser muy similares.

El comportamiento tensional inducido por una capa granular, según la configuración de la carga se detalla a continuación:

Condición de carga interior

En un sistema de pavimento de hormigón, considerando una subbase granular de CBR=50% y subrasante de baja capacidad de soporte, y para los casos de " L/l "=2 y " L/l "=5, los niveles de tensiones son prácticamente los mismos que en un sistema de una capa (losa – subrasante), no encontrándose diferencias importantes en los niveles de tensión cuando se utilizan espesores de subbase menores a 25 cm. En cambio para espesores mayores o iguales a 25 cm, la presencia de la capa granular logra una mayor tasa en la reducción de la tensión en la losa, la cual se hace más significativa a medida que aumenta el espesor del material granular.

Cuando se considera una capa de mejoramiento de CBR=10% con espesores menores a 38 cm y para los casos de " L/l "=2 y " L/l "=5, el nivel de tensión no se verá afectado por la presencia del material, pero, para espesores mayores o iguales a 38 cm de mejoramiento de CBR=10%, se comienza apreciar un efecto sobre el rendimiento estructural del pavimento, aportando en la disminución de la tensión en la losa, el cual se hace más significativo a medida que aumenta el espesor de la capa de apoyo.

Condición de carga de borde

Para esta condición, los niveles de tensiones, utilizando espesores menores a 38 cm de subbase granular de CBR=50% y para los casos de largos de losas más acotados (" L/l "=2), se visualizan tensiones muy similares al caso de un sistema de una capa, sin embargo, para espesores mayores o iguales a 38 cm, comienzan apreciarse tasas de reducción de tensión mayores, y a medida que aumenta el espesor, el efecto sobre el rendimiento estructural del pavimento, es más favorable.

Ahora, para los casos de " L/l "=5, la subbase de CBR=50%, logra tasas significativas de reducción de tensión, a partir de espesores mayores o iguales a 25 cm, por lo tanto, aquellos espesores menores a 25 cm, el efecto sobre el rendimiento estructural del pavimento, es despreciable o nulo, obteniendo tensiones muy similares a la de un sistema de pavimento sin la subbase granular.

Al evaluar niveles de tensiones, utilizando una capa de mejoramiento de CBR=10% y para el caso de " L/l "=2, los resultados indican que para espesores menores a 51 cm, la tasa de reducción de tensión es despreciable, mientras que para espesores mayores o iguales a 51 cm, la capa de mejoramiento comienza aportar, en cierta medida, en la disminución del esfuerzo de tensión en la losa, cuyo efecto, toma mayor significancia a medida que aumenta el espesor del material de apoyo.

Para el caso de " L/l "=5, la capa de mejoramiento de CBR=10%, logra una mayor tasa de reducción de tensión para espesores mayores o iguales a 38 cm, por lo tanto, para espesores menores a 38 cm, el nivel de tensión será, en la práctica, el mismo o muy similar, al no considerar la capa de apoyo.

Condición de carga de esquina

El efecto de una subbase granular de CBR=50% sobre el rendimiento estructural de un pavimento de hormigón, ante una carga de esquina, y, para los casos de " L/l "=2, se comienza apreciar para espesores mayores o iguales a 38 cm, por consiguiente, para espesores menores a 38 cm, la tasa de reducción de tensión, producto de la capa de apoyo, es prácticamente nula.

Dado los casos de " L/l "=5, la subbase de CBR=50%, toma relevancia en la disminución de las tensiones, para espesores mayores o iguales a 25 cm, por ende, los niveles de tensiones para espesores menores a 25 cm, se asemejan a la de un pavimento de una capa (losa – subrasante).

El comportamiento de una capa de mejoramiento de CBR=10%, sólo se reducirá a entregar un soporte estable y uniforme a la losa de hormigón, en aquellos casos donde los espesores de la capa de apoyo sean menores a 51 cm, mientras que para espesores mayores o iguales a 51 cm, se comienza apreciar mayores tasas de reducción en los niveles de tensión. Teoría válida para los casos de " L/l "=2.

Para los casos de " L/l "=5, los resultados indican que, para espesores menores a 38 cm de capa de mejoramiento de CBR=10%, no adquiere participación significativa en la tasa de reducción de las tensiones en la losa. Sin embargo, cuando se utilizan espesores mayores o iguales a 38 cm, el rendimiento estructural del pavimento se verá favorecido por el material de apoyo.

5.2- Análisis de Deflexión

La condición crítica para la deflexión en la losa, corresponde a la condición de carga de esquina seguido por la carga de borde e interior. Es decir, el suelo de fundación o subrasante es, principalmente, afectado por la condición de carga de esquina.

Muy por el contrario que en el análisis de tensión, las deflexiones aumentan a medida que el largo de losa disminuye. Vale decir, las losas cortas de hormigón experimentan deflexiones mayores que un pavimento de hormigón tradicional, y más aún, cuando el suelo de subrasante es de baja calidad, requiriendo abordar con mayor atención las capas de apoyo.

5.1.2- Análisis de Deflexión producto una Capa Granular

El comportamiento de una capa de apoyo intermedia, entre una losa y un suelo de fundación de baja capacidad de soporte, arroja como resultado que las deflexiones disminuyen, a medida que aumente el espesor de subbase. Sin embargo, el aporte de una subbase granular de CBR=50%, se empieza apreciar para espesores mayores o iguales a 25 cm. Mientras que una capa de mejoramiento logra afectar el comportamiento de deflexión para espesores superiores o iguales a 38 cm. De esta manera, la disminución de las deflexiones en la losa, para espesores de capa granular menores a 25 cm, tiende a ser despreciable.

En cuanto a la comparación del aporte de una subbase de CBR=50% y una capa de mejoramiento de CBR=10%, se puede decir que existe una diferencia significativa en los niveles de deflexión en la losa, a partir de espesores de capa mayores o iguales a 25 cm para los casos de largo de losa mayor ($L/l=5$). En cambio, para losas de largo más acotado ($L/l=2$) la diferencia significativa se presenta para espesores mayores o iguales a 38 cm. Por lo tanto, los niveles de deflexión, entre una capa de apoyo u otra, son similares para espesores menores a 25 cm.

El comportamiento de deflexión inducido por una capa granular, según la configuración de la carga se detalla a continuación:

Condición de carga interior

Espesores menores a 38 cm de subbase granular de CBR=50% y para los casos de $L/l=2$, los niveles de deflexión no se verán afectados por la presencia del material de apoyo, sin embargo, para espesores mayores o iguales a 38 cm, la tasa de reducción de deflexión de la losa adquiere mayor significancia.

Para los casos de $L/l=5$, y cuyos espesores de subbase de CBR=50% sean menores a 25 cm, las deflexiones se mantienen semejantes al comportamiento de un pavimento, sin considerar la capa granular, mientras que para espesores mayores o iguales a 25 cm se aprecian tasas de reducción de deflexión un tanto más significativas.

La presencia de una capa de mejoramiento de CBR=10% no afectará en la reducción de las deflexiones cuando se utilicen espesores menores a 51 cm, no obstante, para espesores mayores a 51 cm se comienza a reflejar participación sobre los niveles de deflexión de la losa. Esta condición es representativa para los casos de $L/l=2$.

Cuando los espesores de mejoramiento de CBR=10% sean mayores o iguales a 38 cm y para los casos de $L/l=5$, se podrá distinguir tasas mayores en la disminución de la deflexión de la losa. Sin embargo, aquellos espesores, del material de apoyo, menores a 38 cm, las deflexiones se

comportarán muy similares a las de un pavimento sin consideración de capa granular, es decir, losa sobre subrasante.

Condición de carga de borde

La utilización de espesores menores a 51 cm de subbase granular de CBR=50%, y en los casos de " L/l "=2, tendrá poca o nula participación sobre la reducción de las deflexiones del pavimento, mientras tanto, para espesores mayores o iguales a 51 cm se perciben tasas mayores de reducción en los niveles de deflexión de la losa.

Para los casos de " L/l "=5 y cuyos espesores sean mayores o iguales a 25 cm de subbase (CBR=50%), los niveles de deflexiones experimentan reducciones considerables, sin embargo para espesores menores a 25 cm, el efecto del material granular no afectará el comportamiento de deflexión de la losa.

El efecto de una capa de mejoramiento de CBR=10%, sobre la reducción de las deflexiones del pavimento, sólo se impondrá para aquellos espesores superiores a 51 cm, por ende, para espesores menores o iguales a 51 cm, los niveles de reducción de deflexión serán nulos o despreciables. Válido para los casos de " L/l "=2.

Los niveles de deflexión de la losa, cuando se utilizan espesores de mejoramiento (CBR=10%) inferiores a 38 cm y para los casos de " L/l "=5, no se verán significativamente afectados, pero, para espesores mayores o iguales a 38 cm, se refleja una tasa mayor en los niveles de deflexión.

Condición de carga de esquina

Para los casos de largo de losa acotados (" L/l "=2), una subbase granular de CBR=50% no afecta prácticamente en nada en la reducción de los niveles de deflexión de la losa, al menos para espesores menores o iguales a 64 cm, por ende, el comportamiento de dicha subbase, y para los espesores enunciados, sólo se reducirá a proporcionar una plataforma estable y uniforme a la losa de hormigón.

La presencia de una subbase granular de CBR=50% en los casos de " L/l "=5, reflejan tasas mayores de reducción en los niveles de deflexión para espesores mayores o iguales a 25 cm, mientras que para espesores inferiores a 25 cm el comportamiento de deflexión de la losa es relativamente el mismo al de un pavimento, sin la consideración del material granular.

La utilización de una capa de mejoramiento en los casos de " L/l "=2, no proporcionará reducción en los niveles de deflexión de la losa. Según los resultados, lo planteado es válido para espesores menores a 100 cm, sin embargo, para un espesor de 100 cm, si bien, existe una disminución en la deflexión de la losa, ésta es pequeña, el cual se puede despreciar.

A partir de espesores mayores o iguales a 38 cm de mejoramiento (CBR=10%) y en los casos de " L/l "=5, se distinguirán tasas mayores de reducción de deflexión, mientras que para espesores menores a 38 cm, el aporte del material granular se reducirá a proporcionar una plataforma estable y uniforme a la losa de hormigón.

5.3- Análisis del efecto de una Capa Granular en el valor de K

Las estimaciones de K_c , realizadas a partir de la condición de carga interior en función del comportamiento tensional y para los casos de " L/l "=2, dan como resultados, valores sobrestimados y en algunos casos ilógicos, ya que, para espesores mayores a 35 cm de subbase (CBR=50%) y/o mejoramiento (CBR=10%), los valores de K_c , superan al valor de K correspondiente al material de apoyo analizado. Mientras que, para los casos de " L/l "=5, si bien, no ocurre una sobrestimación tan exagerada, como en el caso anterior, las tendencias de las curvas indican que para espesores superiores a 40 cm de las capas de apoyo consideradas, los valores de K_c serán ilógicos, superando el valor de K correspondiente al material de apoyo.

Por otra parte, para los casos de " L/l "=2, los K_c resultantes, a partir de la condición de carga interior y en función del comportamiento de deflexión, comprenden valores muy cercanos al K inicial para todo espesor analizado. Además, no se distinguen diferencias para los diferentes valores de " a/l " considerados. Sin embargo, las estimaciones de K_c , para los casos de " L/l "=5, se puede apreciar una representación más adecuada para el aumento del valor de K dado un material granular, ya que, en ningún caso, el valor de K_c , supera al valor de K de cada material, las estimaciones, si bien son despreciables para espesores menores a 25 cm. A partir de espesores superiores a 25 cm, se logra un aumento en K. Además, se logra visualizar que, a mayor relación de " a/l ", superior será el valor del módulo de reacción compuesto.

Dado que las estimaciones del aumento, en el valor de K, se realizaron para los casos de largo de losas de " L/l "=2 y " L/l "=5. Según los resultados, las relaciones más acordes a una representación de un ensayo de placa de carga, se da para los casos de " L/l "=5, ya que para los casos de " L/l "=2, conlleva analizar sobre losas de largos muy pequeños, el cual se aleja un poco del concepto de la placa de carga.

Las estimaciones de K_c , realizadas para las condiciones de carga interior y borde, resultaron ser similares. Sólo se puede apuntar, que los valores de K_c obtenidos a partir de la configuración de carga de borde son levemente inferiores. Esto se puede deber a que, las deflexiones para dicha condición de carga son mayores, por ende, el efecto de una capa granular, en un suelo de subrasante, será menor. De todas formas, este estudio avala la estimación del parámetro K_c , a partir de la condición de carga interior, y de acuerdo al comportamiento de deflexión, ya que, se asemeja de manera más cercana al concepto de ensayo de placa de carga.

El efecto de una subbase de CBR=50%, en el aumento del valor de K, este, depende del espesor de la capa y de la relación " a/l ", ya que, a mayor espesor, superior será el valor de K_c , mientras que para un mismo espesor el valor de K_c , tomará distintos valores dependiendo del valor de " a/l ", es decir, a mayor relación de " a/l ", mayor será el valor de K_c . Por ejemplo, para un espesor de 64 cm de subbase de CBR=50%, el valor de K_c , comprende entre los valores de 20 a 36 MPa/m, para las relaciones de " a/l " de 0,05 y 0,40, respectivamente. Pero, para espesores inferiores a 25 cm, el valor de K_c será prácticamente el mismo y despreciable, para todo orden del parámetro " a/l " ($0,05 \leq a/l \leq 0,40$).

Una capa de mejoramiento de CBR=10%, logra entregar capacidad de soporte a un suelo de subrasante, a partir de espesores mayores a 30 cm, en el cual, la elección del valor de K_c , dependerá del espesor de la capa (mayores a 30 cm) y de la relación de " a/l ". Es decir, según los resultados obtenidos en este estudio, indican que para un espesor de 100 cm, el rango de valores de K_c fluctúa entre 25 a 44 MPa/m para las relaciones de " a/l " de 0,05 y 0,40, respectivamente. Mientras, que para espesores inferiores o iguales a 30 cm, no se refleja un aumento en el valor de K, para los casos de " a/l " comprendidos entre 0,05 y 0,40, es decir ($0,05 \leq a/l \leq 0,40$).

Para un completo análisis del módulo de reacción compuesto, K_c , las relaciones obtenidas en este estudio, se comparan con las recomendaciones realizadas por los distintos autores presentados en el acápite 2.2. Para la comparación, se contemplan las relaciones existentes, que se consideran más apropiadas para la estimación del K_c , y aquellas donde el valor del módulo de reacción de la subrasante es de 14 MPa/m (subrasante de baja capacidad de soporte). Mientras que las estimaciones del presente estudio, consideradas para el análisis, pertenecen a las obtenidas en las Figuras 4.19 y 4.20 para el caso de $a/l=0,40$, dado que poseen los valores más altos de cada material. Además, se incluyen las relaciones obtenidas a partir del método de multicapas, calculadas mediante BISAR, cuyas curvas surgen de las Figuras 4.20 y 4.21, para misma condición de a/l .

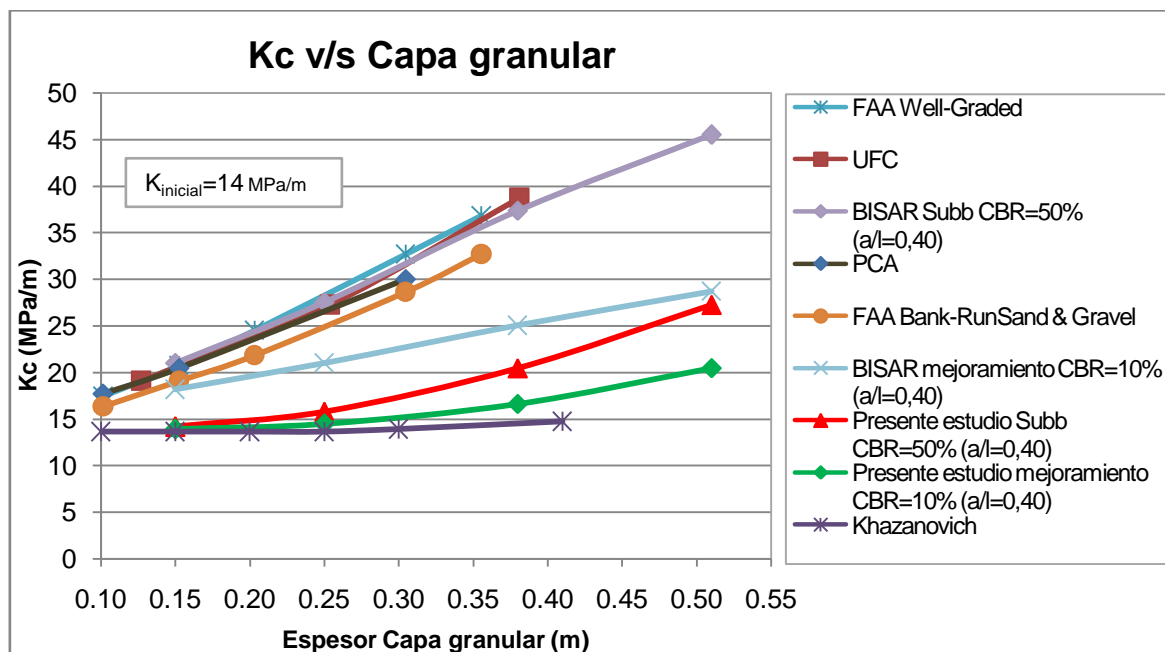


Figura 5.1 Comparación de recomendaciones existentes en la obtención del K_c versus a las estimadas en este estudio

De la gráfica, se puede apreciar, que las estimaciones del valor de K_c , obtenidas con BISAR, para una subbase de CBR=50% posee valores similares a las recomendaciones de los métodos UFC, FAA y PCA, mientras que las estimaciones realizadas con ISLAB2000 para una subbase de CBR=50% y mejoramiento de CBR=10% se asemejan a la recomendación realizada por Khazanovich, especialmente para valores de capa granular menores o iguales a 25 cm. Pero, a medida que aumenta el espesor, las estimaciones del presente estudio experimentan un aumento en el valor de K_c , en contraste a la propuesta de Khazanovich, que prácticamente asume la no inclusión en el aumento del valor de K_c por la presencia de un material de apoyo.

Por otro lado, las recomendaciones de los métodos UFC, FAA y PCA, e incluso la estimación realizada con BISAR para un material de CBR=50%, parecen ser excesivamente elevadas respecto al valor de K_c inicial (14 MPa/m), ya que, para un espesor de capa granular de 25 cm, dichos métodos consideran un aumento en el valor de K_c del orden del 80%, mientras que la estimación del presente estudio para una subbase de CBR=50% representa un aumento en K_c de alrededor del 15% y para una capa de mejoramiento (CBR=10%) no aplica, de igual forma que recomienda Khazanovich.

6- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los pavimentos de losas cortas de hormigón poseen la ventaja, que al disminuir la longitud de losa, es posible reducir su espesor, sin afectar el comportamiento estructural. Una reducción en la longitud, conlleva a que las tensiones disminuyan. Al contrario, las deflexiones tienden a ser mayores. Dicho esto, las deflexiones de mayor magnitud pueden provocar problemas en el comportamiento de la subrasante, más aún, cuando se presentan suelos de fundación de baja capacidad de soporte.

Los suelos de fundación de baja capacidad de soporte conllevan a la estructura de pavimento, a estar muy expuestas a sufrir algún tipo de falla o daño, ya que las tensiones y deflexiones aumentan significativamente cuando estos suelos se encuentran como apoyo. Más aún, cuando sistemas de losas cortas de hormigón sea la capa de rodaje. Con un espesor de losa reducido, las deflexiones aumentan significativamente. Por lo tanto, es primordial abordar los tipos de falla, tales como, el bombeo ("pumping"), la erosión y la deformación permanente de las capas de soporte. Dadas estas condiciones, la rigidez de la subrasante adquiere un papel mucho más importante en el diseño del espesor de las losas cortas de hormigón.

El comportamiento de una losa corta de hormigón depende, en su mayoría, por la rigidez de la subrasante, K , y por el espesor de losa. Con una buena conjugación de estos parámetros, las cargas impuestas por el tránsito, no serán un problema para el sistema de pavimento. Ahora, si se conjuga una relación de subrasante de mala calidad con una losa corta de espesor muy delgado, ya sea 8 cm, una forma eficiente y conservadora que se podría tomar, sería aumentar el espesor de la losa. Dicho aumento, provocará que los niveles de tensión y deflexión en la losa, disminuyan. Paralelamente, cuando un espesor de losa es muy delgado, las capas granulares adquieren mayor participación sobre el rendimiento estructural del pavimento, logrando tasas mayores de reducción de esfuerzos, a diferencia de cuando el espesor de losa es alto o grueso.

El efecto de una capa granular en el rendimiento estructural de un pavimento de hormigón, se puede desglosar en función de los niveles de tensión y deflexión. Dado que la condición de carga de borde produce las tensiones mayores, los resultados obtenidos en este estudio indican que una subbase granular de $CBR=50\%$ y, para los casos de largos de losa más acotados (" $L/l=2$ "), tiene efecto sobre el rendimiento estructural, a partir de espesores superiores o iguales a 38 cm, por ende, para espesores inferiores a 38 cm, dicho material sólo se reducirá a aportar una plataforma estable y uniforme a la losa de hormigón. Ahora, analizando la subbase de $CBR=50\%$ y para los casos de largos de losas establecidos por el parámetro adimensional " $L/l=5$ ", se visualizan tasas mayores de reducción de tensión cuando se utilizan espesores mayores o iguales a 25 cm, mientras que para los espesores inferiores a 25 cm, las reducciones de tensión son nulas o despreciables. Por otro lado, al considerar una capa de mejoramiento de $CBR=10\%$ y en los casos de " $L/l=2$ ", se logran reducciones de tensión considerables, a partir de espesores mayores o iguales a 51 cm, por consiguiente, aquellos espesores menores a 51 cm, la capa de mejoramiento no conllevará a que las tensiones en la losa disminuyan significativamente. Sin embargo, al utilizar la capa de mejoramiento ($CBR=10\%$) para los casos de " $L/l=5$ ", se presentan tasas mayores de reducción de tensión a partir de espesores superiores o iguales a 38 cm, pero para espesores menores a 38 cm, las disminuciones de tensiones son despreciables. Por lo tanto, cuando se utilicen subbases de $CBR=50\%$ y/o capas de mejoramientos de $CBR=10\%$ en pavimentos de hormigón, los niveles de tensión, serán prácticamente los mismos, cuyos espesores sean inferiores a 38 cm para los casos de " $L/l=2$ ", mientras que para los casos de " $L/l=5$ " y espesores de las capas de apoyo consideradas sean menores a 25 cm, ocurrirá el mismo fenómeno mencionado anteriormente, no encontrándose diferencias tensionales significativas al emplear un material u otro.

El rendimiento estructural provocado por una capa granular, en función de los niveles de deflexión, es necesario analizarlos para la condición de carga de esquina, ya que, es, en dicha configuración de carga, donde se producen las deflexiones máximas en un pavimento de hormigón. Por consiguiente, al presentarse espesores inferiores a 64 cm de subbase granular de CBR=50% en los casos de $L/l=2$, no se distinguen tasas de reducción de deflexión significativas. Sin embargo, cuando el largo de losa está controlado para los $L/l=5$, las deflexiones experimentan reducciones importantes a partir de espesores mayores o iguales a 25 cm. Por lo tanto, para espesores menores a 25 cm, las deflexiones se asemejan a las de un pavimento sin la consideración de una capa granular. Ahora, la utilización de una capa de mejoramiento de CBR=10% cuyos espesores sean inferiores a 100 cm en los casos de $L/l=2$, las deflexiones que se experimentan, son muy similares a las de un pavimento de una capa (losa-subrasante). No obstante, para los casos de $L/l=5$, la capa de mejoramiento entrega tasas mayores de reducción de deflexión de la losa, para espesores superiores o iguales a 38 cm, mientras que para los espesores inferiores a 38 cm, el efecto del material granular no será más que un apoyo estable y uniforme para la losa de hormigón. En resumidas cuentas, los niveles de deflexión, al considerar una subbase de CBR=50% y/o un mejoramiento de CBR=10%, serán similares, cuando se utilicen espesores menores a 64 cm, sin embargo en los casos de $L/l=5$, las deflexiones serán relativamente las mismas cuyos espesores sean inferiores a 25 cm.

Por consiguiente, para pavimentos de losas cortas de hormigón, las capas de apoyo, ya sean base, subbase o capa de mejoramiento, tienen una mayor importancia en el diseño y posterior vida útil. Sin embargo, se debe tener claro, que los niveles de tensión y deflexión, utilizando una capa granular de CBR=50% o de un CBR=10%, serán prácticamente los mismos. Como consecuencia de esto, en la estructuración de pavimentos, no deben colocarse, en forma sucesiva, capas de suelos con módulos muy diferentes, pues el comportamiento de una capa con módulo alto, no será el que estrictamente le corresponde, si ella se apoya sobre un suelo con módulo muy inferior. Tal como pasaría al colocar una subbase, de alto módulo, sobre un suelo de subrasante de baja capacidad de soporte.

Como es sabido, el objetivo principal de las capas granulares, es proporcionar una plataforma estable y uniforme a la losa de hormigón, sin embargo, este estudio avala lo dicho por otras investigaciones, las cuales postulan que una capa granular, tiende a aumentar en cierta medida el valor de K, el cual puede llegar a ser considerado en el diseño. Las estimaciones del valor del módulo de reacción compuesto, K_c , obtenidas en este estudio, indican que la forma más adecuada de estimar dicho valor, cuando no se puede realizar el ensayo de placa de carga, es mediante el comportamiento de deflexión provocado por una carga interior y en función del parámetro adimensional a/l , el cual es lo más cercano al concepto de un ensayo de placa de carga, ya que para las condiciones de carga de borde y esquina, no representan el mismo concepto.

Según el análisis tensional, y a partir de las mediciones de deflexión obtenidas con la condición de carga interior y para los casos de $L/l=5$, fue posible la determinación de una relación entre el espesor de un material granular y el valor de K_c . Dos tipos de subbases con características de resistencia muy diferentes se consideraron para obtener la capacidad de soporte que entregan de forma independiente cada uno de los suelos analizados.

Los resultados obtenidos en este estudio, indican que una subbase granular de CBR=50% entrega un mayor grado de soporte, a un suelo de subrasante, que una capa de mejoramiento de CBR=10%. Sin embargo, las diferencias de soporte aportante, a un suelo de fundación de mala calidad, no reflejan las distintas capacidades de resistencia que existe entre un material y otro. En efecto, para espesores de subbase (CBR=50%) y mejoramiento (CBR=10%) menores o iguales a 25 cm, los valores de K_c obtenidos con las capas de apoyo estudiadas, son muy similares, y sólo a partir de espesores mayores a 25 cm se puede apreciar una diferencia un tanto más significativa, la cual se hace mayor a medida que el espesor de los materiales aumenten.

A partir de las estimaciones realizadas por este estudio, el aumento del valor de K, dada una capa granular, depende del espesor de la capa y de la relación " a/l ", ya que, a mayor espesor, superior será el valor de Kc, mientras que para un mismo espesor el valor de Kc, tomará distintos valores dependiendo del valor de " a/l ". Es decir, a mayor relación de " a/l ", mayor será el valor de Kc. De todas formas, el efecto de una subbase granular de CBR=50% en el valor de K, se logra distinguir a partir de espesores superiores a 25 cm, mientras que al considerar una capa de mejoramiento de CBR=10%, el valor de K tiende a aumentar, significativamente, para espesores superiores a 30 cm. Por lo tanto, las estimaciones del valor de Kc, recomendada por este estudio, para una subbase de CBR=50% y/o una capa de mejoramiento de CBR=10%, vienen dado por las Figuras 4.19 y 4.20.

Además, dichas relaciones fueron comparadas con las estimaciones existentes en la literatura, a partir de la cual, se concluyó, que las estimaciones hechas por los distintos autores, poseían valores de Kc excesivamente elevados respecto al valor inicial de K, y que por lo demás, no especificaban para qué tipo de material de apoyo estaban orientadas sus recomendaciones. Sin embargo las estimaciones de Kc, realizadas en base a la teoría de multicapas (BISAR) y para una subbase granular de CBR=50%, entregaron resultados similares a las estimaciones existentes. Mientras que los valores Kc, dado por las Figuras 4.19 y 4.20, se asemejan a la recomendación realizada por Khazanovich.

Si bien, se sabe que las capas granulares entregan un cierto aumento en la capacidad de soporte de una subrasante, la estimación de Kc, debe realizarse de forma segura y conservadora, dada la importancia de este parámetro en un diseño de pavimento de hormigón. Una sobrestimación de dicho parámetro puede conllevar a una reducción en la vida útil de un pavimento, provocado por el exceso de grietas y/o deformación permanente. Además, se debe tener en cuenta, que el objetivo principal de una subbase es proporcionar un soporte estable y uniforme a la losa de hormigón. Por consiguiente, este estudio recomienda no aumentar el valor de K, cuyos espesores de capa granular sean inferiores a 25 cm.

7- BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO. (1993). *Guide for Design of Pavements Structures*.
- AASHTO. (2004). *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures Part. 3 Design Analysis*.
- AASHTO. (2008). *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, Interim Edition: A Manual of Practice*. Washington.
- B.V., Shell International Oil Products. (1998). *BISAR 3.0 User Manual*. The Hague.
- Bulut, R. (2001). *Finite Element Method Analysis of Slabs on Elastic Half Space Expansive Soil Foundations*.
- Cervantes, V., & Roesler, J. (2009). *Performance of Concrete Pavements With Optimized Slab Geometry*. Urbana-Champaign: University of Illinois at Urbana-Champaign.
- FAA. (2009). "Airport Pavement Design and Evaluation" AC 150/5320-6E. Federal Aviation Administration .
- FAA. (2011). "Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength - PCN" AC 150/5335-5B. Federal Aviation Administration.
- FAA. (2011). "Use of Nondestructive Testing in the Evaluation of Airport Pavements" AC 150/5370-11B. Federal Aviation Administration.
- FAA. (1978). *Diseño y Evaluación de Pavimentos Aeroportuarios*.
- Hall, K. T., Darter, M. I., Hoerner, T. E., & Khazanovich, L. (1997). *LTPP Data Analysis Phase I: Validation of Guidelines for k-Value Selection and Concrete Pavement Performance Prediction, FHWA-RD-96-198*. Federal Highway Administration.
- Hoffman, M., & Thompson, M. (1981). *Mechanistic Interpretation of Nondestructive Pavement Testing Deflections*. Urbana-Champaign.
- Huang, Y. H. (2003). *Pavement Analysis and Design* (2nd Edition ed.). Prentice Hall.
- Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile. (2010). *Análisis y Predicción de Comportamiento de Losas Cortas de Hormigón, Basado en las Experiencias del ICH con Pavimentos de Losa Corta y del Estado del Arte en Pavimentos Tradicionales*. Santiago.
- Ioannides, A. (1989). *Dimensional Analysis in NDT Rigid Pavement Evaluation*.
- Ioannides, A. M., Thompson, M. R., & Barenberg, E. J. (1985). "Westergaard Solutions Reconsidered," *Transportation Research Record* 1043.
- Ioannides, A., & Khazanovich, L. (1993). *Finite Element Analysis of Slabs-on-Grade Using Order Subgrade Soil Models*.
- Jung, Y. s., Zollinger, D. G., Won, M., & Wimsatt, A. J. (2009). *Subbase and Subgrade Performance Investigation for Concrete Pavement, FHWA/TX-09/0-6037-1*. Texas Department of Transportation, Austin, Texas.

- Kerr, A. (1964). *Elastic and Viscoelastic Foundation Models*.
- Khazanovich, L. (2003). Finite Element Analysis of Curling of Slabs on Pasternak Foundation, 16th ASCE Engineering Mechanics Conference. *16th ASCE Engineering Mechanics Conference*.
- Khazanovich, L. (1994). *Structural Analysis of Multi-Layered Concrete Pavement Systems*. Urbana-Champaign, Illinois, EE.UU.: University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Khazanovich, L., Yu, H. T., Rao, S., Galasova, K., Shats, E., & Jones, R. (2000). *ISLAB2000 - Finite Element Analysis Program for Rigid and Composite Pavements. User's Guide*. ERES Consultants Division of Applied Research Associates, Inc. Champaign, Illinois.
- Khazanovich, L., Yu, T., Rao, C., & Selezneva, O. (2002). *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Apenddix QQ NCHRP 1-37A* .
- L. Khazanovich, S. D. (1998). *Backcalculation of Layer Parameters for LTPP Test Sections, Volume I: Slab on Elastic Solid and Slab on Dense-Liquid Foundation Analysis of Rigid Pavements, FHWA-RD-00-086*. Federal Highway Administration, McLean, Virginia.
- Manual de Carreteras Vol N°3: Instrucciones y Criterios de Diseño, Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Vialidad*. (2012). Santiago.
- National Cooperative Highway Research Program. (2004). *Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, NCHRP 1-37A*. Washington.
- Packard, R. G. (1984). *PCA: Thickness-Design Procedure for Concrete Highways and Streets*.
- Pasternak, P. (1954). *Fundamentals of a New Method of Analysis of Structures on Elastic Foundation by Means of Two Subgrade Coefficients*. Moscú.
- Poulos, D. (2000). Foundation Settlement Analysis—Practice versus research. *8 th Spencer J. Buchanan Lecture, Texas A&M University, College Station, TX*.
- Pronk, A. C., & Van den Bol, M. E. (1998). Winkler - Pasternak - Kerr Foundations - Notes on Boundary Conditions. *BCRA conference*. Trondheim.
- Pronk, A. (1993). The Pasternak Foundation: An Attractive Alternative for the Winkler Foundation. *Fifth International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, Vol 1, Purdue University*.
- Shtaerman, I. (1949). *Contact Problems of the Theory of Elasticity*. Moscú.
- U.N.L.P. Apuntes de Coeficiente de Balasto.
- UFC, U.S. Army Corps of Engineers. (2001). *Unified Facilities Criteria (UFC): Airfield Pavement Evaluation*.
- Westergaard, H. M. (1926). *Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis*.
- Westergaard, H. M. (1939). *Stresses in Concrete Runways of Airports*.
- Zhemochkin, B., & Sinitsyn, A. (1947). *Practical Method of Analysis of Plate and Beams on Elastic Foundation Without Winkler's Hypothesis*. Moscú.

ANEXO A

Resultados de tensión, deflexión y módulo de reacción compuesto, a partir de la condición de carga interior

INDICE DE TABLAS

TABLA A.1 CLASIFICACIÓN DE HORMIGÓN DE PAVIMENTO POR RESISTENCIA A FLEXOTRACCIÓN	94
TABLA A.2 RESISTENCIA A LA FLEXOTRACCIÓN EN FUNCIÓN DEL TIPO DE VÍA.....	94
TABLA A.3 VALORES DE TENSIÓN CONDICIÓN DE CARGA INTERIOR Y SUBBASE GRANULAR	95
TABLA A.4 VALORES DE TENSIÓN CONDICIÓN DE CARGA INTERIOR Y CAPA DE MEJORAMIENTO	96
TABLA A.5 VALORES DE DEFLEXIÓN CONDICIÓN DE CARGA INTERIOR Y SUBBASE GRANULAR.....	97
TABLA A.6 VALORES DE DEFLEXIÓN CONDICIÓN DE CARGA INTERIOR Y CAPA DE MEJORAMIENTO.....	98
TABLA A.7 VALORES DE Kc EN FUNCIÓN DEL COMPORTAMIENTO TENSIONAL Y PRODUCTO UNA SUBBASE GRANULAR, CONDICIÓN DE CARGA INTERIOR.....	99
TABLA A.8 VALORES DE Kc EN FUNCIÓN DEL COMPORTAMIENTO TENSIONAL Y PRODUCTO UNA CAPA DE MEJORAMIENTO, CONDICIÓN DE CARGA INTERIOR.....	99
TABLA A.9 VALORES DE Kc EN FUNCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE DEFLEXIÓN Y PRODUCTO UNA SUBBASE GRANULAR, CONDICIÓN DE CARGA INTERIOR.....	99
TABLA A.10 VALORES DE Kc EN FUNCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE DEFLEXIÓN Y PRODUCTO UNA CAPA DE MEJORAMIENTO, CONDICIÓN DE CARGA INTERIOR.....	100
TABLA A.11 VALORES DE MÓDULO DE ELASTICIDAD COMPUESTO, Ec, OBTENIDOS CON BISAR, PRODUCTO DE UNA SUBBASE GRANULAR	100
TABLA A.12 VALORES DE MÓDULO DE ELASTICIDAD COMPUESTO, Ec, OBTENIDOS CON BISAR, PRODUCTO DE UNA CAPA DE MEJORAMIENTO	100
TABLA A.13 VALORES DE Kc SEGÚN MÉTODO MULTICAPAS, PRODUCTO DE UNA SUBBASE GRANULAR.....	101
TABLA A.14 VALORES DE Kc SEGÚN MÉTODO MULTICAPAS, PRODUCTO DE UNA CAPA DE MEJORAMIENTO...	101

Nota: Hormigones de pavimentos, son aquellos hormigones que se clasifican principalmente por su resistencia a flexotracción, y ensayadas a 28 días, de acuerdo a NCh 1017. Resistencias que varían desde un grado HF 3 a HF 6, es decir, desde 30 kg/cm² a 60 kg/cm² de resistencia a la flexotracción, respectivamente.

Tabla A.1 Clasificación de hormigón de pavimento por resistencia a flexotracción

Grados de flexotracción	Resistencia a la flexotracción	
	MPa	Kgf/cm ²
HF 3,0	3,0	30
HF 3,5	3,5	35
HF 4,0	4,0	40
HF 4,5	4,5	45
HF 5,0	5,0	50
HF 5,5	5,5	55
HF 6,0	6,0	60

Fuente: NCh 1017

Por otro lado, el valor a asignar a este parámetro dependerá de las posibilidades que existan en la zona del proyecto para preparar hormigones de calidad. Sin embargo, se recomiendan los valores que se indican en la tabla A.2 (*Manual de Carreteras, Vol. 3, 2012*).

Tabla A.2 Resistencia a la flexotracción en función del tipo de vía

Tipo de Vía	Resistencia a la flexotracción (MPa)
Vías principales y Autopistas	4,8 – 5,4
Vías Colectoras	4,6 – 5,0
Caminos Secundarios	4,2 – 4,8

Fuente: Manual de Carreteras, Vol. 3, 2012

Dada estas condicionantes, el estudio asume, un hormigón de pavimento HF 5, con un valor de 5,0 MPa de resistencia a la flexotracción, por lo cual, cuyos valores de tensión máxima mayores a 5,0 MPa quedan absueltos ante toda realidad.

Tabla A.3 Valores de tensión condición de carga interior y subbase granular

Casos (Cl)	L/l	a/l	L [m]	K [MPa/m]	E _s [MPa] [CBR=50%]	Tensión σ_{islab} [MPa]						σ_{West} [MPa]
						e _s =0 [cm]	e _s =15 [cm]	e _s =25 [cm]	e _s =38 [cm]	e _s =51 [cm]	e _s =64 [cm]	
1	2	0,05	1,74	14	190	0,66	0,66	0,64	0,59	0,51	0,42	0,80
2	2	0,10	1,56			1,56	1,54	1,47	1,30	1,06	0,82	1,92
3	2	0,20	1,30			2,01	1,96	1,79	1,41	0,99	0,67	2,55
4	2	0,30	1,20			3,97	3,83	3,38	2,49	1,65	1,06	5,00
5	2	0,40	1,10			5,91	5,61	4,74	3,23	1,99	1,22	8,00
6	5	0,05	4,35	14	190	0,68	0,68	0,66	0,61	0,54	0,45	0,80
7	5	0,10	3,90			1,58	1,57	1,51	1,35	1,13	0,89	1,92
8	5	0,20	3,25			2,11	2,07	1,91	1,55	1,15	0,80	2,55
9	5	0,30	3,00			4,24	4,11	3,71	2,88	2,02	1,36	5,00
10	5	0,40	2,75			6,44	6,18	5,41	3,95	2,61	1,68	8,00

L/l	a/l	h [m]	P [KN]	$\sigma_{islab} \cdot h^2 / P$						$\frac{\sigma_{West} \cdot h^2}{P}$
				e _s =0 [cm]	e _s =15 [cm]	e _s =25 [cm]	e _s =38 [cm]	e _s =51 [cm]	e _s =64 [cm]	
2	0,05	0,15	10	1,49	1,47	1,43	1,32	1,14	0,93	1,79
	0,10	0,13	20	1,32	1,30	1,25	1,10	0,90	0,69	1,62
	0,20	0,10	20	1,00	0,98	0,89	0,70	0,49	0,33	1,27
	0,30	0,09	40	0,80	0,77	0,68	0,50	0,33	0,21	1,01
	0,40	0,08	60	0,63	0,60	0,51	0,34	0,21	0,13	0,85
5	0,05	0,15	10	1,53	1,52	1,48	1,37	1,20	1,00	1,79
	0,10	0,13	20	1,34	1,32	1,27	1,14	0,95	0,75	1,62
	0,20	0,10	20	1,05	1,03	0,95	0,77	0,57	0,40	1,27
	0,30	0,09	40	0,86	0,83	0,75	0,58	0,41	0,27	1,01
	0,40	0,08	60	0,69	0,66	0,58	0,42	0,28	0,18	0,85

Nomenclatura:

L/l = Parámetro adimensional para el efecto del tamaño del largo de losa

a/l = Parámetro adimensional para el efecto del tamaño del área cargada

h = Espesor de losa

L = Largo de losa

K = Módulo de reacción de la subrasante

E_s = Módulo de elasticidad de subbase granular de CBR=50%

e_s = Espesor de subbase granular de CBR=50%

σ_{islab} = Tensión de tracción máxima en fibra inferior de la losa calculada con ISLAB2000

σ_{West} = Tensión de tracción máxima en fibra inferior de la losa según ecuación de Westergaard

P = Carga aplicada

$\frac{\sigma \cdot h^2}{P}$ = Forma funcional adimensional de la tensión en la losa

Tabla A.4 Valores de tensión condición de carga interior y capa de mejoramiento

Casos (Cl)	L/l	a/l	L [m]	K [MPa/m]	E _s [MPa] [CBR=10%]	Tensión σ_{islab} [MPa]						σ_{West} [MPa]
						e _s =0 [cm]	e _s =15 [cm]	e _s =25 [cm]	e _s =38 [cm]	e _s =51 [cm]	e _s =100 [cm]	
11	2	0,05	1,74	14	80	0,66	0,66	0,65	0,63	0,59	0,33	0,80
12	2	0,10	1,56			1,56	1,55	1,52	1,44	1,31	0,61	1,92
13	2	0,20	1,30			2,01	1,99	1,91	1,71	1,41	0,46	2,55
14	2	0,30	1,20			3,97	3,91	3,70	3,19	2,51	0,70	5,00
15	2	0,40	1,10			5,91	5,79	5,36	4,40	3,26	0,79	8,00
16	5	0,05	4,35	14	80	0,68	0,68	0,67	0,65	0,61	0,36	0,80
17	5	0,10	3,90			1,58	1,58	1,55	1,48	1,36	0,68	1,92
18	5	0,20	3,25			2,11	2,09	2,02	1,84	1,56	0,57	2,55
19	5	0,30	3,00			4,24	4,18	4,00	3,54	2,90	0,93	5,00
20	5	0,40	2,75			6,44	6,33	5,96	5,09	3,98	1,12	8,00

L/l	a/l	h [m]	P [KN]	$\sigma_{islab} \cdot h^2 / P$						$\frac{\sigma_{West} \cdot h^2}{P}$
				e _s =0 [cm]	e _s =15 [cm]	e _s =25 [cm]	e _s =38 [cm]	e _s =51 [cm]	e _s =100 [cm]	
2	0,05	0,15	10	1,49	1,48	1,46	1,41	1,32	0,74	1,79
	0,10	0,13	20	1,32	1,31	1,29	1,22	1,11	0,52	1,62
	0,20	0,10	20	1,00	0,99	0,95	0,85	0,70	0,23	1,27
	0,30	0,09	40	0,80	0,79	0,75	0,64	0,51	0,14	1,01
	0,40	0,08	60	0,63	0,62	0,57	0,47	0,35	0,08	0,85
5	0,05	0,15	10	1,53	1,52	1,51	1,46	1,37	0,81	1,79
	0,10	0,13	20	1,34	1,33	1,31	1,25	1,15	0,58	1,62
	0,20	0,10	20	1,05	1,04	1,01	0,92	0,78	0,28	1,27
	0,30	0,09	40	0,86	0,85	0,81	0,72	0,59	0,19	1,01
	0,40	0,08	60	0,69	0,67	0,64	0,54	0,42	0,12	0,85

Nomenclatura:

L/l = Parámetro adimensional para el efecto del tamaño del largo de losa

a/l = Parámetro adimensional para el efecto del tamaño del área cargada

h = Espesor de losa

L = Largo de losa

K = Módulo de reacción de la subrasante

E_s = Módulo de elasticidad de capa de mejoramiento de CBR=10%

e_s = Espesor de capa de mejoramiento de CBR=10%

σ_{islab} = Tensión de tracción máxima en fibra inferior de la losa calculada con ISLAB2000

σ_{West} = Tensión de tracción máxima en fibra inferior de la losa según ecuación de Westergaard

P = Carga aplicada

$\frac{\sigma \cdot h^2}{P}$ = Forma funcional adimensional de la tensión en la losa

Tabla A.5 Valores de deflexión condición de carga interior y subbase granular

Casos (Cl)	L/l	a/l	L [m]	h [m]	E _s [MPa] [CBR=50%]	Deflexión w _{islab} [mm]						w _{West} [mm]
						e _s =0 [cm]	e _s =15 [cm]	e _s =25 [cm]	e _s =38 [cm]	e _s =51 [cm]	e _s =64 [cm]	
1	2	0,05	1,74	0,15	190	0,170	0,169	0,168	0,165	0,159	0,153	0,120
2	2	0,10	1,56	0,13		0,417	0,416	0,411	0,399	0,383	0,366	0,297
3	2	0,20	1,30	0,10		0,602	0,598	0,585	0,558	0,529	0,505	0,435
4	2	0,30	1,20	0,09		1,353	1,343	1,311	1,247	1,186	1,143	0,997
5	2	0,40	1,10	0,08		2,318	2,297	2,237	2,131	2,043	1,988	1,748
6	5	0,05	4,35	0,15	190	0,133	0,132	0,131	0,126	0,117	0,107	0,120
7	5	0,10	3,90	0,13		0,325	0,323	0,317	0,299	0,272	0,241	0,297
8	5	0,20	3,25	0,10		0,466	0,460	0,441	0,396	0,339	0,287	0,435
9	5	0,30	3,00	0,09		1,034	1,017	0,964	0,846	0,710	0,596	0,997
10	5	0,40	2,75	0,08		1,734	1,698	1,584	1,352	1,116	0,940	1,748

L/l	a/l	l [m]	K [MPa/m]	P [KN]	w _{islab} Kl ² /P						w _{West} Kl ² /P
					e _s =0 [cm]	e _s =15 [cm]	e _s =25 [cm]	e _s =38 [cm]	e _s =51 [cm]	e _s =64 [cm]	
2	0,05	0,87	14	10	0,176	0,176	0,174	0,171	0,165	0,159	0,125
	0,10	0,78		20	0,174	0,174	0,172	0,167	0,160	0,153	0,124
	0,20	0,65		20	0,170	0,169	0,165	0,158	0,149	0,143	0,123
	0,30	0,60		40	0,164	0,162	0,158	0,151	0,143	0,138	0,121
	0,40	0,55		60	0,156	0,155	0,151	0,144	0,138	0,134	0,118
5	0,05	0,87	14	10	0,138	0,137	0,135	0,130	0,122	0,111	0,125
	0,10	0,78		20	0,136	0,135	0,132	0,125	0,114	0,101	0,124
	0,20	0,65		20	0,132	0,130	0,125	0,112	0,096	0,081	0,123
	0,30	0,60		40	0,125	0,123	0,117	0,102	0,086	0,072	0,121
	0,40	0,55		60	0,117	0,115	0,107	0,091	0,075	0,063	0,118

Nomenclatura:

L/l = Parámetro adimensional para el efecto del tamaño del largo de losa

a/l = Parámetro adimensional para el efecto del tamaño del área cargada

h = Espesor de losa

L = Largo de losa

K = Módulo de reacción de la subrasante

E_s = Módulo de elasticidad de subbase granular de CBR=50%

e_s = Espesor de subbase granular de CBR=50%

w_{islab} = Deflexión máxima de la losa calculada con ISLAB2000

w_{West} = Deflexión máxima de la losa según ecuación de Westergaard

l = Radio de rigidez relativa losa-suelo de fundación

P = Carga aplicada

$\frac{w \cdot Kl^2}{P}$ = Forma funcional adimensional de la deflexión de la losa

Tabla A.6 Valores de deflexión condición de carga interior y capa de mejoramiento

Casos (Cl)	L/l	a/l	L [m]	h [m]	E _s [MPa] [CBR=10%]	Deflexión w _{islab} [mm]						W _{West} [mm]
						e _s =0 [cm]	e _s =15 [cm]	e _s =25 [cm]	e _s =38 [cm]	e _s =51 [cm]	e _s =100 [cm]	
11	2	0,05	1,74	0,15	80	0,170	0,170	0,169	0,168	0,165	0,147	0,120
12	2	0,10	1,56	0,13		0,417	0,416	0,414	0,409	0,400	0,352	0,297
13	2	0,20	1,30	0,10		0,602	0,600	0,594	0,580	0,559	0,490	0,435
14	2	0,30	1,20	0,09		1,353	1,349	1,334	1,297	1,248	1,116	0,997
15	2	0,40	1,10	0,08		2,318	2,309	2,280	2,212	2,132	1,957	1,748
16	5	0,05	4,35	0,15	80	0,133	0,133	0,132	0,130	0,126	0,096	0,120
17	5	0,10	3,90	0,13		0,325	0,324	0,322	0,314	0,300	0,212	0,297
18	5	0,20	3,25	0,10		0,466	0,463	0,455	0,433	0,397	0,247	0,435
19	5	0,30	3,00	0,09		1,034	1,027	1,003	0,940	0,848	0,517	0,997
20	5	0,40	2,75	0,08		1,734	1,718	1,666	1,535	1,356	0,828	1,748

L/l	a/l	l [m]	K [MPa/m]	P [KN]	w _{islab} Kl ² /P						w _{West} Kl ² /P
					e _s =0 [cm]	e _s =15 [cm]	e _s =25 [cm]	e _s =38 [cm]	e _s =51 [cm]	e _s =100 [cm]	
2	0,05	0,87	14	10	0,176	0,176	0,175	0,174	0,171	0,153	0,125
	0,10	0,78		20	0,174	0,174	0,173	0,171	0,167	0,147	0,124
	0,20	0,65		20	0,170	0,170	0,168	0,164	0,158	0,138	0,123
	0,30	0,60		40	0,164	0,163	0,161	0,157	0,151	0,135	0,121
	0,40	0,55		60	0,156	0,156	0,154	0,149	0,144	0,132	0,118
5	0,05	0,87	14	10	0,138	0,138	0,137	0,134	0,130	0,100	0,125
	0,10	0,78		20	0,136	0,136	0,134	0,131	0,125	0,089	0,124
	0,20	0,65		20	0,132	0,131	0,129	0,122	0,112	0,070	0,123
	0,30	0,60		40	0,125	0,124	0,121	0,114	0,103	0,062	0,121
	0,40	0,55		60	0,117	0,116	0,112	0,104	0,091	0,056	0,118

Nomenclatura:

L/l = Parámetro adimensional para el efecto del tamaño del largo de losa

a/l = Parámetro adimensional para el efecto del tamaño del área cargada

h = Espesor de losa

L = Largo de losa

K = Módulo de reacción de la subrasante

E_s = Módulo de elasticidad de capa de mejoramiento de CBR=10%

e_s = Espesor de capa de mejoramiento de CBR=10%

w_{islab} = Deflexión máxima de la losa calculada con ISLAB2000

w_{West} = Deflexión máxima de la losa según ecuación de Westergaard

l = Radio de rigidez relativa losa-suelo de fundación

P = Carga aplicada

$\frac{w \cdot Kl^2}{P}$ = Forma funcional adimensional de la deflexión de la losa

Tabla A.7 Valores de Kc en función del comportamiento tensional y producto una subbase granular, condición de carga interior

$K_{inicial}=14$ MPa/m	Kc [MPa/m]		
Casos (CI)	e subb=15 cm	e subb=25 cm	e subb=38 cm
1	16	27	84
2	18	37	119
3	21	54	213
4	22	60	232
5	23	66	251
6	15	18	35
7	15	20	46
8	16	26	84
9	16	26	85
10	16	28	87

Tabla A.8 Valores de Kc en función del comportamiento tensional y producto una capa de mejoramiento, condición de carga interior

$K_{inicial}=14$ MPa/m	Kc [MPa/m]		
Casos (CI)	e capa=15 cm	e capa=25 cm	e capa=38 cm
11	15	21	37
12	16	22	46
13	17	29	75
14	17	31	83
15	17	33	91
16	14	16	21
17	14	16	23
18	14	18	32
19	15	19	33
20	15	19	35

Tabla A.9 Valores de Kc en función del comportamiento de deflexión y producto una subbase granular, condición de carga interior

$K_{inicial}=14$ MPa/m	Kc [MPa/m]				
Casos (CI)	e subb=15 cm	e subb=25 cm	e subb=38 cm	e subb=51 cm	e subb=64 cm
1	14	14	14	15	16
2	14	14	14	15	16
3	14	14	15	16	17
4	14	14	15	16	17
5	14	14	15	16	17
6	14	14	15	17	20
7	14	14	16	19	23
8	14	15	18	24	32
9	14	15	19	25	34
10	14	16	20	27	36

Tabla A.10 Valores de Kc en función del comportamiento de deflexión y producto una capa de mejoramiento, condición de carga interior

K _{inicial} =14 MPa/m	Kc [MPa/m]				
	Casos (Cl)	e capa=15 cm	e capa=25 cm	e capa=38 cm	e capa=51 cm
11	14	14	14	14	16
12	14	14	14	15	17
13	14	14	14	15	17
14	14	14	14	15	17
15	14	14	14	15	17
16	14	14	14	15	25
17	14	14	14	16	29
18	14	14	16	18	41
19	14	14	16	19	43
20	14	14	17	20	44

Tabla A.11 Valores de módulo de elasticidad compuesto, Ec, obtenidos con BISAR, producto de una subbase granular

E _{inicial} =29 MPa	Ec [MPa]				
	Casos (Cl)	e subb=15 cm	e subb=25 cm	e subb=38 cm	e subb=51 cm
6	31	34	38	42	47
7	32	35	40	45	50
8	33	37	44	51	58
9	34	38	46	53	61
10	34	39	48	57	64

Tabla A.12 Valores de módulo de elasticidad compuesto, Ec, obtenidos con BISAR, producto de una capa de mejoramiento

E _{inicial} =29 MPa	Ec [MPa]				
	Casos (Cl)	e capa=15 cm	e capa=25 cm	e capa=38 cm	e capa=51 cm
6	29	31	33	35	41
7	30	32	34	36	43
8	31	33	35	38	47
9	31	33	36	39	48
10	32	34	37	40	50

La conversión de módulo de elasticidad compuesto (E_c) a módulo de reacción compuesto (K_c), se llevo a cabo según las siguientes relaciones:

$$k = 69,78 * \log CBR - 10,16 \quad ec\ 2.1$$

$$E_s = 17,6 * CBR^{0,64} \quad CBR < 12\% \quad ec\ 3.2$$

$$E_s = 22,1 * CBR^{0,55} \quad 12 < CBR < 80\% \quad ec\ 3.3$$

Donde,

K = Módulo de reacción de la subrasante, [MPa/m]

E_s = Módulo de elasticidad de la subrasante, [MPa]

CBR = Razón de soporte de california, [%]

Tabla A.13 Valores de K_c según método multicapas, producto de una subbase granular

$K_{inicial}=14$ MPa/m	K_c [MPa/m]				
Casos (Cl)	e subb=15 cm	e subb=25 cm	e subb=38 cm	e subb=51 cm	e subb=64 cm
6	17	21	26	31	36
7	18	22	29	34	39
8	20	25	33	40	46
9	21	26	35	42	49
10	21	28	37	45	51

Tabla A.14 Valores de K_c según método multicapas, producto de una capa de mejoramiento

$K_{inicial}=14$ MPa/m	K_c [MPa/m]				
Casos (Cl)	e capa=15 cm	e capa=25 cm	e capa=38 cm	e capa=51 cm	e capa=100 cm
6	14	17	20	22	30
7	15	18	21	24	32
8	17	20	22	26	36
9	17	20	24	28	37
10	18	21	25	29	39

ANEXO B

Resultados de tensión, deflexión y módulo de reacción compuesto, a partir de la condición de carga de borde

INDICE DE TABLAS

TABLA B.1 VALORES DE TENSIÓN CONDICIÓN DE CARGA DE BORDE Y SUBBASE GRANULAR	104
TABLA B.2 VALORES DE TENSIÓN CONDICIÓN DE CARGA DE BORDE Y CAPA DE MEJORAMIENTO	105
TABLA B.3 VALORES DE DEFLEXIÓN CONDICIÓN DE CARGA DE BORDE Y SUBBASE GRANULAR	106
TABLA B.4 VALORES DE DEFLEXIÓN CONDICIÓN DE CARGA DE BORDE Y CAPA DE MEJORAMIENTO	107
TABLA B.5 VALORES DE Kc EN FUNCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE DEFLEXIÓN Y PRODUCTO UNA SUBBASE GRANULAR, CONDICIÓN DE CARGA DE BORDE.....	108
TABLA B.6 VALORES DE Kc EN FUNCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE DEFLEXIÓN Y PRODUCTO UNA CAPA DE MEJORAMIENTO, CONDICIÓN DE CARGA DE BORDE.....	108

Tabla B.1 Valores de tensión condición de carga de borde y subbase granular

Casos (CB)	L/l	a/l	L [m]	K [MPa/m]	E _s [MPa] [CBR=50%]	Tensión σ_{islab} [MPa]						σ_{West} [MPa]
						e _s =0 [cm]	e _s =15 [cm]	e _s =25 [cm]	e _s =38 [cm]	e _s =51 [cm]	e _s =64 [cm]	
1	2	0,05	1,74	14	190	1,26	1,25	1,22	1,14	1,01	0,85	1,77
2	2	0,10	1,56			2,71	2,68	2,59	2,34	1,97	1,57	3,83
3	2	0,20	1,30			3,04	2,97	2,76	2,26	1,68	1,19	4,76
4	2	0,30	1,20			4,79	4,65	4,22	3,29	2,31	1,56	9,07
5	2	0,40	1,10			6,84	6,56	5,72	4,14	2,70	1,72	13,90
6	5	0,05	4,35	14	190	1,49	1,48	1,44	1,35	1,20	1,02	1,77
7	5	0,10	3,90			3,26	3,23	3,12	2,84	2,42	1,95	3,83
8	5	0,20	3,25			3,97	3,89	3,63	3,03	2,30	1,67	4,76
9	5	0,30	3,00			7,29	7,11	6,51	5,21	3,78	2,63	9,07
10	5	0,40	2,75			10,3	9,95	8,87	6,74	4,64	3,09	13,90

L/l	a/l	h [m]	P [KN]	$\sigma_{islab} \cdot h^2 / P$						$\frac{\sigma_{West} \cdot h^2}{P}$
				e _s =0 [cm]	e _s =15 [cm]	e _s =25 [cm]	e _s =38 [cm]	e _s =51 [cm]	e _s =64 [cm]	
2	0,05	0,15	10	2,82	2,81	2,74	2,56	2,27	1,91	3,97
	0,10	0,13	20	2,29	2,27	2,19	1,98	1,67	1,33	3,24
	0,20	0,10	20	1,51	1,48	1,37	1,13	0,84	0,59	2,37
	0,30	0,09	40	0,97	0,94	0,85	0,67	0,47	0,31	1,83
	0,40	0,08	60	0,73	0,70	0,61	0,44	0,29	0,18	1,48
5	0,05	0,15	10	3,34	3,32	3,24	3,04	2,70	2,30	3,97
	0,10	0,13	20	2,76	2,73	2,64	2,40	2,04	1,65	3,24
	0,20	0,10	20	1,98	1,94	1,81	1,51	1,15	0,83	2,37
	0,30	0,09	40	1,47	1,44	1,31	1,05	0,76	0,53	1,83
	0,40	0,08	60	1,10	1,06	0,95	0,72	0,50	0,33	1,48

Nomenclatura:

L/l = Parámetro adimensional para el efecto del tamaño del largo de losa

a/l = Parámetro adimensional para el efecto del tamaño del área cargada

h = Espesor de losa

L = Largo de losa

K = Módulo de reacción de la subrasante

E_s = Módulo de elasticidad de subbase granular de CBR=50%

e_s = Espesor de subbase granular de CBR=50%

σ_{islab} = Tensión de tracción máxima en fibra inferior de la losa calculada con ISLAB2000

σ_{West} = Tensión de tracción máxima en fibra inferior de la losa según ecuación de Westergaard

P = Carga aplicada

$\frac{\sigma \cdot h^2}{P}$ = Forma funcional adimensional de la tensión en la losa

Tabla B.2 Valores de tensión condición de carga de borde y capa de mejoramiento

Casos (CB)	L/l	a/l	L [m]	K [MPa/m]	E _s [MPa] [CBR=10%]	Tensión σ_{islab} [MPa]						σ_{West} [MPa]
						e _s =0 [cm]	e _s =15 [cm]	e _s =25 [cm]	e _s =38 [cm]	e _s =51 [cm]	e _s =100 [cm]	
11	2	0,05	1,74	14	80	1,26	1,25	1,24	1,21	1,14	0,70	1,77
12	2	0,10	1,56			2,71	2,70	2,66	2,54	2,35	1,22	3,83
13	2	0,20	1,30			3,04	3,01	2,91	2,66	2,27	0,84	4,76
14	2	0,30	1,20			4,79	4,73	4,53	4,02	3,31	1,06	9,07
15	2	0,40	1,10			6,84	6,72	6,33	5,37	4,17	1,13	13,90
16	5	0,05	4,35	14	80	1,49	1,48	1,47	1,43	1,35	0,84	1,77
17	5	0,10	3,90			3,26	3,25	3,20	3,07	2,85	1,53	3,83
18	5	0,20	3,25			3,97	3,94	3,82	3,51	3,04	1,20	4,76
19	5	0,30	3,00			7,29	7,21	6,94	6,24	5,23	1,84	9,07
20	5	0,40	2,75			10,3	10,2	9,65	8,42	6,78	2,10	13,90

L/l	a/l	h [m]	P [KN]	$\sigma_{islab} \cdot h^2 / P$						$\frac{\sigma_{West} \cdot h^2}{P}$
				e _s =0 [cm]	e _s =15 [cm]	e _s =25 [cm]	e _s =38 [cm]	e _s =51 [cm]	e _s =100 [cm]	
2	0,05	0,15	10	2,82	2,82	2,79	2,71	2,56	1,56	3,97
	0,10	0,13	20	2,29	2,28	2,25	2,15	1,98	1,03	3,24
	0,20	0,10	20	1,51	1,50	1,45	1,32	1,13	0,42	2,37
	0,30	0,09	40	0,97	0,96	0,92	0,81	0,67	0,21	1,83
	0,40	0,08	60	0,73	0,72	0,67	0,57	0,44	0,12	1,48
5	0,05	0,15	10	3,34	3,33	3,30	3,20	3,04	1,89	3,97
	0,10	0,13	20	2,76	2,75	2,71	2,60	2,41	1,30	3,24
	0,20	0,10	20	1,98	1,96	1,90	1,75	1,52	0,60	2,37
	0,30	0,09	40	1,47	1,46	1,40	1,26	1,06	0,37	1,83
	0,40	0,08	60	1,10	1,08	1,03	0,90	0,72	0,22	1,48

Nomenclatura:

L/l = Parámetro adimensional para el efecto del tamaño del largo de losa

a/l = Parámetro adimensional para el efecto del tamaño del área cargada

h = Espesor de losa

L = Largo de losa

K = Módulo de reacción de la subrasante

E_s = Módulo de elasticidad de capa de mejoramiento de CBR=10%

e_s = Espesor de capa de mejoramiento de CBR=10%

σ_{islab} = Tensión de tracción máxima en fibra inferior de la losa calculada con ISLAB2000

σ_{West} = Tensión de tracción máxima en fibra inferior de la losa según ecuación de Westergaard

P = Carga aplicada

$\frac{\sigma \cdot h^2}{P}$ = Forma funcional adimensional de la tensión en la losa

Tabla B.3 Valores de deflexión condición de carga de borde y subbase granular

Casos (CB)	L/l	a/l	L [m]	h [m]	E _s [MPa] [CBR=50%]	Deflexión w _{islab} [mm]						w _{West} [mm]
						e _s =0 [cm]	e _s =15 [cm]	e _s =25 [cm]	e _s =38 [cm]	e _s =51 [cm]	e _s =64 [cm]	
1	2	0,05	1,74	0,15	190	0,417	0,416	0,414	0,409	0,401	0,391	0,396
2	2	0,10	1,56	0,13		0,998	0,997	0,991	0,974	0,950	0,923	0,946
3	2	0,20	1,30	0,10		1,372	1,368	1,353	1,317	1,274	1,236	1,285
4	2	0,30	1,20	0,09		2,943	2,932	2,897	2,822	2,740	2,674	2,705
5	2	0,40	1,10	0,08		4,798	4,780	4,722	4,608	4,498	4,420	4,328
6	5	0,05	4,35	0,15	190	0,433	0,432	0,427	0,415	0,393	0,366	0,396
7	5	0,10	3,90	0,13		1,040	1,035	1,019	0,976	0,908	0,827	0,946
8	5	0,20	3,25	0,10		1,436	1,423	1,379	1,273	1,131	0,992	1,285
9	5	0,30	3,00	0,09		3,073	3,038	2,923	2,656	2,331	2,038	2,705
10	5	0,40	2,75	0,08		5,015	4,941	4,705	4,201	3,649	3,200	4,328

L/l	a/l	l [m]	K [MPa/m]	P [KN]	w _{islab} Kl ² /P						w _{West} Kl ² /P
					e _s =0 [cm]	e _s =15 [cm]	e _s =25 [cm]	e _s =38 [cm]	e _s =51 [cm]	e _s =64 [cm]	
2	0,05	0,87	14	10	0,432	0,431	0,429	0,424	0,416	0,405	0,410
	0,10	0,78		20	0,417	0,417	0,414	0,407	0,397	0,386	0,396
	0,20	0,65		20	0,388	0,386	0,382	0,372	0,360	0,349	0,363
	0,30	0,60		40	0,356	0,354	0,350	0,341	0,331	0,323	0,327
	0,40	0,55		60	0,324	0,322	0,319	0,311	0,303	0,298	0,292
5	0,05	0,87	14	10	0,449	0,447	0,443	0,430	0,408	0,379	0,410
	0,10	0,78		20	0,435	0,433	0,426	0,408	0,380	0,346	0,396
	0,20	0,65		20	0,406	0,402	0,390	0,359	0,320	0,280	0,363
	0,30	0,60		40	0,372	0,367	0,353	0,321	0,282	0,246	0,327
	0,40	0,55		60	0,338	0,333	0,317	0,283	0,246	0,216	0,292

Nomenclatura:

L/l = Parámetro adimensional para el efecto del tamaño del largo de losa

a/l = Parámetro adimensional para el efecto del tamaño del área cargada

h = Espesor de losa

L = Largo de losa

K = Módulo de reacción de la subrasante

E_s = Módulo de elasticidad de subbase granular de CBR=50%

e_s = Espesor de subbase granular de CBR=50%

w_{islab} = Deflexión máxima de la losa calculada con ISLAB2000

w_{West} = Deflexión máxima de la losa según ecuación de Westergaard

l = Radio de rigidez relativa losa-suelo de fundación

P = Carga aplicada

$\frac{w \cdot Kl^2}{P}$ = Forma funcional adimensional de la deflexión de la losa

Tabla B.4 Valores de deflexión condición de carga de borde y capa de mejoramiento

Casos (CB)	L/l	a/l	L [m]	h [m]	E _s [MPa] [CBR=10%]	Deflexión w _{islab} [mm]						W _{West} [mm]
						e _s =0 [cm]	e _s =15 [cm]	e _s =25 [cm]	e _s =38 [cm]	e _s =51 [cm]	e _s =100 [cm]	
11	2	0,05	1,74	0,15	80	0,417	0,416	0,415	0,413	0,409	0,381	0,396
12	2	0,10	1,56	0,13		0,998	0,998	0,995	0,988	0,975	0,898	0,946
13	2	0,20	1,30	0,10		1,372	1,370	1,364	1,346	1,318	1,208	1,285
14	2	0,30	1,20	0,09		2,943	2,938	2,923	2,882	2,824	2,629	2,705
15	2	0,40	1,10	0,08		4,798	4,790	4,764	4,698	4,610	4,373	4,328
16	5	0,05	4,35	0,15	80	0,433	0,432	0,430	0,425	0,415	0,336	0,396
17	5	0,10	3,90	0,13		1,040	1,038	1,031	1,012	0,977	0,747	0,946
18	5	0,20	3,25	0,10		1,436	1,431	1,412	1,359	1,275	0,881	1,285
19	5	0,30	3,00	0,09		3,073	3,058	3,007	2,870	2,661	1,820	2,705
20	5	0,40	2,75	0,08		5,015	4,983	4,876	4,602	4,211	2,892	4,328

L/l	a/l	l [m]	K [MPa/m]	P [KN]	w _{islab} Kl ² /P						w _{West} Kl ² /P
					e _s =0 [cm]	e _s =15 [cm]	e _s =25 [cm]	e _s =38 [cm]	e _s =51 [cm]	e _s =100 [cm]	
2	0,05	0,87	14	10	0,432	0,431	0,430	0,428	0,424	0,395	0,410
	0,10	0,78		20	0,417	0,417	0,416	0,413	0,408	0,375	0,396
	0,20	0,65		20	0,388	0,387	0,385	0,380	0,372	0,341	0,363
	0,30	0,60		40	0,356	0,355	0,353	0,348	0,341	0,318	0,327
	0,40	0,55		60	0,324	0,323	0,321	0,317	0,311	0,295	0,292
5	0,05	0,87	14	10	0,449	0,448	0,446	0,440	0,430	0,349	0,410
	0,10	0,78		20	0,435	0,434	0,431	0,423	0,409	0,312	0,396
	0,20	0,65		20	0,406	0,404	0,399	0,384	0,360	0,249	0,363
	0,30	0,60		40	0,372	0,370	0,364	0,347	0,322	0,220	0,327
	0,40	0,55		60	0,338	0,336	0,329	0,310	0,284	0,195	0,292

Nomenclatura:

L/l = Parámetro adimensional para el efecto del tamaño del largo de losa

a/l = Parámetro adimensional para el efecto del tamaño del área cargada

h = Espesor de losa

L = Largo de losa

K = Módulo de reacción de la subrasante

E_s = Módulo de elasticidad de capa de mejoramiento de CBR=10%

e_s = Espesor de capa de mejoramiento de CBR=10%

w_{islab} = Deflexión máxima de la losa calculada con ISLAB2000

w_{West} = Deflexión máxima de la losa según ecuación de Westergaard

l = Radio de rigidez relativa losa-suelo de fundación

P = Carga aplicada

$\frac{w \cdot Kl^2}{P}$ = Forma funcional adimensional de la deflexión de la losa

Tabla B.5 Valores de Kc en función del comportamiento de deflexión y producto una subbase granular, condición de carga de borde

K _{inicial} =14 MPa/m	Kc [MPa/m]				
	Casos (CB)	e subb=15 cm	e subb=25 cm	e subb=38 cm	e subb=51 cm
1	14	14	14	15	15
2	14	14	14	15	15
3	14	14	14	15	16
4	14	14	14	15	15
5	14	14	14	15	15
6	14	14	15	16	18
7	14	14	15	17	20
8	14	14	17	20	25
9	14	15	17	21	26
10	14	15	18	22	27

Tabla B.6 Valores de Kc en función del comportamiento de deflexión y producto una capa de mejoramiento, condición de carga de borde

K _{inicial} =14 MPa/m	Kc [MPa/m]				
	Casos (CB)	e capa=15 cm	e capa=25 cm	e capa=38 cm	e capa=51 cm
11	14	14	14	14	15
12	14	14	14	14	16
13	14	14	14	14	16
14	14	14	14	14	16
15	14	14	14	14	16
16	14	14	14	15	21
17	14	14	14	15	24
18	14	14	15	17	31
19	14	14	15	17	32
20	14	14	16	18	32

ANEXO C

Resultados de tensión y deflexión, a partir de la condición de carga de borde

INDICE DE TABLAS

TABLA C.1 VALORES DE TENSIÓN CONDICIÓN DE CARGA DE ESQUINA Y SUBBASE GRANULAR	111
TABLA C.2 VALORES DE TENSIÓN CONDICIÓN DE CARGA DE ESQUINA Y CAPA DE MEJORAMIENTO	112
TABLA C.3 VALORES DE DEFLEXIÓN CONDICIÓN DE CARGA DE ESQUINA Y SUBBASE GRANULAR.....	113
TABLA C.4 VALORES DE DEFLEXIÓN CONDICIÓN DE CARGA DE ESQUINA Y CAPA DE MEJORAMIENTO.....	114

Tabla C.1 Valores de tensión condición de carga de esquina y subbase granular

Casos (CE)	L/l	a/l	L [m]	K [MPa/m]	E _s [MPa] [CBR=50%]	Tensión σ_{islab} [MPa]						σ_{West} [MPa]
						e _s =0 [cm]	e _s =15 [cm]	e _s =25 [cm]	e _s =38 [cm]	e _s =51 [cm]	e _s =64 [cm]	
1	2	0,05	1,74	14	190	0,78	0,77	0,75	0,70	0,63	0,54	1,04
2	2	0,10	1,56			1,69	1,68	1,63	1,49	1,28	1,03	2,45
3	2	0,20	1,30			2,04	2,01	1,88	1,57	1,20	0,87	3,27
4	2	0,30	1,20			3,56	3,45	3,13	2,50	1,80	1,24	6,08
5	2	0,40	1,10			5,60	5,29	4,43	3,23	2,12	1,37	8,34
6	5	0,05	4,35	14	190	1,08	1,06	1,04	0,97	0,85	0,72	1,04
7	5	0,10	3,90			2,55	2,53	2,43	2,20	1,85	1,48	2,45
8	5	0,20	3,25			3,49	3,41	3,17	2,61	1,96	1,40	3,27
9	5	0,30	3,00			7,01	6,81	6,19	4,88	3,49	2,40	6,08
10	5	0,40	2,75			10,8	10,4	9,21	6,90	4,69	3,11	8,34

L/l	a/l	h [m]	P [KN]	$\sigma_{islab} \cdot h^2 / P$						$\frac{\sigma_{West} \cdot h^2}{P}$
				e _s =0 [cm]	e _s =15 [cm]	e _s =25 [cm]	e _s =38 [cm]	e _s =51 [cm]	e _s =64 [cm]	
2	0,05	0,15	10	1,75	1,73	1,69	1,58	1,42	1,22	2,33
	0,10	0,13	20	1,43	1,42	1,38	1,26	1,08	0,87	2,07
	0,20	0,10	20	1,02	1,00	0,93	0,78	0,60	0,43	1,63
	0,30	0,09	40	0,72	0,70	0,63	0,50	0,36	0,25	1,23
	0,40	0,08	60	0,60	0,56	0,47	0,34	0,23	0,15	0,89
5	0,05	0,15	10	2,42	2,38	2,34	2,17	1,92	1,63	2,33
	0,10	0,13	20	2,16	2,14	2,06	1,86	1,57	1,25	2,07
	0,20	0,10	20	1,74	1,70	1,58	1,30	0,98	0,70	1,63
	0,30	0,09	40	1,42	1,38	1,25	0,99	0,71	0,48	1,23
	0,40	0,08	60	1,15	1,11	0,98	0,74	0,50	0,33	0,89

Nomenclatura:

L/l = Parámetro adimensional para el efecto del tamaño del largo de losa

a/l = Parámetro adimensional para el efecto del tamaño del área cargada

h = Espesor de losa

L = Largo de losa

K = Módulo de reacción de la subrasante

E_s = Módulo de elasticidad de subbase granular de CBR=50%

e_s = Espesor de subbase granular de CBR=50%

σ_{islab} = Tensión de tracción máxima en fibra superior de la losa calculada con ISLAB2000

σ_{West} = Tensión de tracción máxima en fibra superior de la losa según ecuación de Westergaard

P = Carga aplicada

$\frac{\sigma \cdot h^2}{P}$ = Forma funcional adimensional de la tensión en la losa

Tabla C.2 Valores de tensión condición de carga de esquina y capa de mejoramiento

Casos (CE)	L/l	a/l	L [m]	K [MPa/m]	E _s [MPa] [CBR=10%]	Tensión σ_{islab} [MPa]						σ_{West} [MPa]
						e _s =0 [cm]	e _s =15 [cm]	e _s =25 [cm]	e _s =38 [cm]	e _s =51 [cm]	e _s =100 [cm]	
11	2	0,05	1,74	14	80	0,78	0,77	0,77	0,74	0,71	0,45	1,04
12	2	0,10	1,56			1,69	1,68	1,66	1,60	1,49	0,81	2,45
13	2	0,20	1,30			2,04	2,03	1,97	1,82	1,58	0,62	3,27
14	2	0,30	1,20			3,56	3,51	3,36	2,99	2,51	0,86	6,08
15	2	0,40	1,10			5,60	5,47	5,03	4,17	3,25	0,91	8,34
16	5	0,05	4,35	14	80	1,08	1,07	1,06	1,03	0,97	0,59	1,04
17	5	0,10	3,90			2,55	2,54	2,50	2,39	2,21	1,15	2,45
18	5	0,20	3,25			3,49	3,46	3,35	3,06	2,63	1,00	3,27
19	5	0,30	3,00			7,01	6,92	6,64	5,92	4,91	1,67	6,08
20	5	0,40	2,75			10,8	10,6	10,1	8,71	6,94	2,11	8,34

L/l	a/l	h [m]	P [KN]	$\sigma_{islab} \cdot h^2 / P$						$\frac{\sigma_{West} \cdot h^2}{P}$
				e _s =0 [cm]	e _s =15 [cm]	e _s =25 [cm]	e _s =38 [cm]	e _s =51 [cm]	e _s =100 [cm]	
2	0,05	0,15	10	1,75	1,73	1,72	1,67	1,59	1,01	2,33
	0,10	0,13	20	1,43	1,42	1,41	1,35	1,26	0,69	2,07
	0,20	0,10	20	1,02	1,01	0,98	0,91	0,79	0,31	1,63
	0,30	0,09	40	0,72	0,71	0,68	0,60	0,51	0,17	1,23
	0,40	0,08	60	0,60	0,58	0,64	0,45	0,35	0,10	0,89
5	0,05	0,15	10	2,42	2,40	2,38	2,31	2,18	1,32	2,33
	0,10	0,13	20	2,16	2,15	2,12	2,02	1,87	0,97	2,07
	0,20	0,10	20	1,74	1,72	1,67	1,53	1,31	0,50	1,63
	0,30	0,09	40	1,42	1,40	1,34	1,20	0,99	0,34	1,23
	0,40	0,08	60	1,15	1,13	1,07	0,93	0,74	0,23	0,89

Nomenclatura:

L/l = Parámetro adimensional para el efecto del tamaño del largo de losa

a/l = Parámetro adimensional para el efecto del tamaño del área cargada

h = Espesor de losa

L = Largo de losa

K = Módulo de reacción de la subrasante

E_s = Módulo de elasticidad de capa de mejoramiento de CBR=10%

e_s = Espesor de capa de mejoramiento de CBR=10%

σ_{islab} = Tensión de tracción máxima en fibra superior de la losa calculada con ISLAB2000

σ_{West} = Tensión de tracción máxima en fibra superior de la losa según ecuación de Westergaard

P = Carga aplicada

$\frac{\sigma \cdot h^2}{P}$ = Forma funcional adimensional de la tensión en la losa

Tabla C.3 Valores de deflexión condición de carga de esquina y subbase granular

Casos (CE)	L/l	a/l	L [m]	h [m]	E _s [MPa] [CBR=50%]	Deflexión w _{islab} [mm]						W _{West} [mm]
						e _s =0 [cm]	e _s =15 [cm]	e _s =25 [cm]	e _s =38 [cm]	e _s =51 [cm]	e _s =64 [cm]	
1	2	0,05	1,74	0,15	190	0,710	0,709	0,705	0,696	0,680	0,659	0,992
2	2	0,10	1,56	0,13		1,663	1,659	1,648	1,618	1,572	1,519	2,334
3	2	0,20	1,30	0,10		2,181	2,173	2,148	2,088	2,012	1,943	3,048
4	2	0,30	1,20	0,09		4,407	4,394	4,343	4,227	4,094	3,983	6,072
5	2	0,40	1,10	0,08		6,756	6,734	6,660	6,505	6,342	6,218	9,047
6	5	0,05	4,35	0,15	190	1,096	1,092	1,078	1,041	0,977	0,898	0,992
7	5	0,10	3,90	0,13		2,583	2,570	2,522	2,395	2,200	1,966	2,334
8	5	0,20	3,25	0,10		3,447	3,411	3,287	2,990	2,601	2,224	3,048
9	5	0,30	3,00	0,09		7,135	7,038	6,723	6,007	5,149	4,376	6,072
10	5	0,40	2,75	0,08		11,28	11,09	10,47	9,159	7,744	6,574	9,047

L/l	a/l	l [m]	K [MPa/m]	P [KN]	w _{islab} Kl ² /P						w _{West} Kl ² /P
					e _s =0 [cm]	e _s =15 [cm]	e _s =25 [cm]	e _s =38 [cm]	e _s =51 [cm]	e _s =64 [cm]	
2	0,05	0,87	14	10	0,736	0,735	0,731	0,721	0,704	0,683	1,028
	0,10	0,78		20	0,695	0,694	0,689	0,676	0,657	0,635	0,976
	0,20	0,65		20	0,616	0,614	0,607	0,590	0,568	0,549	0,861
	0,30	0,60		40	0,533	0,531	0,525	0,511	0,495	0,481	0,734
	0,40	0,55		60	0,456	0,454	0,449	0,439	0,428	0,419	0,610
5	0,05	0,87	14	10	1,135	1,132	1,118	1,079	1,013	0,931	1,028
	0,10	0,78		20	1,080	1,075	1,054	1,001	0,920	0,822	0,976
	0,20	0,65		20	0,974	0,964	0,928	0,844	0,735	0,628	0,861
	0,30	0,60		40	0,863	0,851	0,813	0,726	0,622	0,529	0,734
	0,40	0,55		60	0,761	0,748	0,706	0,618	0,522	0,443	0,610

Nomenclatura:

L/l = Parámetro adimensional para el efecto del tamaño del largo de losa

a/l = Parámetro adimensional para el efecto del tamaño del área cargada

h = Espesor de losa

L = Largo de losa

K = Módulo de reacción de la subrasante

E_s = Módulo de elasticidad de subbase granular de CBR=50%

e_s = Espesor de subbase granular de CBR=50%

w_{islab} = Deflexión máxima de la losa calculada con ISLAB2000

w_{West} = Deflexión máxima de la losa según ecuación de Westergaard

l = Radio de rigidez relativa losa-suelo de fundación

P = Carga aplicada

$\frac{w \cdot Kl^2}{P}$ = Forma funcional adimensional de la deflexión de la losa

Tabla C.4 Valores de deflexión condición de carga de esquina y capa de mejoramiento

Casos (CE)	L/l	a/l	L [m]	h [m]	E _s [MPa] [CBR=10%]	Deflexión w _{islab} [mm]						W _{West} [mm]
						e _s =0 [cm]	e _s =15 [cm]	e _s =25 [cm]	e _s =38 [cm]	e _s =51 [cm]	e _s =100 [cm]	
11	2	0,05	1,74	0,15	80	0,710	0,709	0,708	0,704	0,696	0,639	0,992
12	2	0,10	1,56	0,13		1,663	1,661	1,656	1,643	1,618	1,470	2,334
13	2	0,20	1,30	0,10		2,181	2,177	2,167	2,136	2,089	1,891	3,048
14	2	0,30	1,20	0,09		4,407	4,399	4,379	4,318	4,229	3,904	6,072
15	2	0,40	1,10	0,08		6,756	6,746	6,713	6,629	6,507	6,137	9,047
16	5	0,05	4,35	0,15	80	1,096	1,092	1,087	1,072	1,041	0,813	0,992
17	5	0,10	3,90	0,13		2,583	2,578	2,540	2,501	2,400	1,742	2,334
18	5	0,20	3,25	0,10		3,447	3,434	3,378	3,231	2,995	1,920	3,048
19	5	0,30	3,00	0,09		7,135	7,094	6,952	6,581	6,022	3,790	6,072
20	5	0,40	2,75	0,08		11,28	11,20	10,92	10,20	9,187	5,745	9,047

L/l	a/l	l [m]	K [MPa/m]	P [KN]	w _{islab} Kl ² /P						w _{West} Kl ² /P
					e _s =0 [cm]	e _s =15 [cm]	e _s =25 [cm]	e _s =38 [cm]	e _s =51 [cm]	e _s =100 [cm]	
2	0,05	0,87	14	10	0,736	0,735	0,734	0,729	0,721	0,662	1,028
	0,10	0,78		20	0,695	0,694	0,692	0,687	0,677	0,614	0,976
	0,20	0,65		20	0,616	0,615	0,612	0,603	0,590	0,534	0,861
	0,30	0,60		40	0,533	0,532	0,529	0,522	0,511	0,472	0,734
	0,40	0,55		60	0,456	0,455	0,453	0,447	0,439	0,414	0,610
5	0,05	0,87	14	10	1,135	1,132	1,127	1,111	1,079	0,842	1,028
	0,10	0,78		20	1,080	1,078	1,062	1,045	1,003	0,728	0,976
	0,20	0,65		20	0,974	0,970	0,954	0,913	0,846	0,542	0,861
	0,30	0,60		40	0,863	0,858	0,840	0,796	0,728	0,458	0,734
	0,40	0,55		60	0,761	0,755	0,736	0,688	0,620	0,388	0,610

Nomenclatura:

L/l = Parámetro adimensional para el efecto del tamaño del largo de losa

a/l = Parámetro adimensional para el efecto del tamaño del área cargada

h = Espesor de losa

L = Largo de losa

K = Módulo de reacción de la subrasante

E_s = Módulo de elasticidad de capa de mejoramiento de CBR=10%

e_s = Espesor de capa de mejoramiento de CBR=10%

w_{islab} = Deflexión máxima de la losa calculada con ISLAB2000

w_{West} = Deflexión máxima de la losa según ecuación de Westergaard

l = Radio de rigidez relativa losa-suelo de fundación

P = Carga aplicada

$\frac{w \cdot Kl^2}{P}$ = Forma funcional adimensional de la deflexión de la losa

ANEXO DIGITAL D

En este acápite, se adjuntan, de forma digital, los archivos entregados por los programas: ISLAB2000 y BISAR, del cual se extrajeron los resultados de los análisis.

