

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO A SOLICITACIONES DE EROSIÓN Y
FATIGA DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO DE CONCRETO
HIDRÁULICO REALIZADOS MEDIANTE LA GUÍA DE DISEÑO AASHTO
93 EN EL SALVADOR**

PRESENTADO POR:

GERSON JAVIER FLORES RIVAS
JULIO ERNESTO MORÁN AGUILAR
GLADIS ELISSA VÁSQUEZ QUINTANILLA

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

CIUDAD UNIVERSITARIA, OCTUBRE 2019

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

MSc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

LIC. CRISTOBAL HERNÁN RÍOS BENÍTEZ

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

DIRECTOR :

ING. JORGE OSWALDO RIVERA FLORES

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO CIVIL

Titulo :

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO A SOLICITACIONES DE EROSIÓN Y
FATIGA DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO DE CONCRETO
HIDRÁULICO REALIZADOS MEDIANTE LA GUÍA DE DISEÑO AASHTO
93 EN EL SALVADOR**

Presentado por :

GERSON JAVIER FLORES RIVAS
JULIO ERNESTO MORÁN AGUILAR
GLADIS ELISSA VÁSQUEZ QUINTANILLA

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Asesores :

ING. MAURICIO ERNESTO VALENCIA
ING. DILBER ANTONIO SÁNCHEZ VIDES

SAN SALVADOR, OCTUBRE 2019

Trabajo de Graduación aprobado por:

Docentes Asesores :

ING. MAURICIO ERNESTO VALENCIA

ING. DILBER ANTONIO SÁNCHEZ VIDES

DEDICATORIA

A mi madre Carmen Rivas

Por su infinito amor y comprensión en cada momento, por brindarme su ayuda cada vez que la he necesitado en diferentes aspectos de mi vida y por creer siempre en mí, por ser la persona que sin importar la situación del día a día siempre hará un esfuerzo extra para cuidar mi bienestar.

A mi padre Guido Flores

Por su apoyo en cada una de las facetas de mi vida y por compartirme su sabiduría ante el mundo, por enseñarme que hay que luchar cada día por ser una mejor persona y que no importa que tan oscuro se vea el panorama tengamos la confianza que siempre habrá un amanecer para cada uno.

A mi hermana Gisela Flores

Por compartir el camino a mi lado y soportar cada enojo que surge por el estrés o diferencia de opiniones, pues sin importar eso, el apoyo y los consejos siempre estuvieron ahí cuando los necesite, siempre te tome de modelo para aprender nuevas cosas.

GERSON JAVIER FLORES RIVAS

DEDICATORIA

A mi madre Telma Aguilar, este logro va dedicado a vos principalmente porque te mereces todo lo bueno que venga de mi parte y sé que dentro de ello estaba el que fuera un profesional, ahora espero que esto te llene de felicidad y orgullo, y para representarte en cualquier momento te prometo que siempre voy a actuar bajo la práctica de valores que me has enseñado.

A mi padre Eliseo Morán, porque sé que te has esforzado al máximo para que mi hermana y yo tuviéramos la oportunidad de estudiar con las mejores condiciones posibles, por eso espero haberte recompensado con el esfuerzo y sacrificio puesto. Además, espero que estés orgulloso de mi ya que tu hijo se convertirá en ingeniero como te lo prometió.

A mi familia, porque también en algún momento me apoyaron como fue necesario y espero todos estén orgullosos de que van a tener a un ingeniero más en la familia. Además, quiero hacer mención de mis abuelos Isidoro, Mesías y Berta, y mi tío Miguel que, aunque no estén con vida sé que desde el cielo están felices por este logro.

JULIO ERNESTO MORÁN AGUILAR

DEDICATORIA

A Dios, por iluminarme lo largo de este camino y por todas las oportunidades que me ha dado para cumplir mis sueños.

A mis padres, que con tanto amor me han dado todo lo necesario para salir adelante y me han apoyado en todas las etapas de mi vida. Les agradezco inmensamente.

GLADIS ELISSA VÁSQUEZ QUINTANILLA

AGRADECIMIENTOS

El más sincero aprecio a todas aquellas personas que aportaron en mi vida, y de las cuales aprendí alguna lección que puse en práctica, sepan que cuando termina una etapa todas esas experiencias que quedan forman el carácter y la vida.

A Dios, por darme seguridad en mis momentos de duda y permitirme cumplir mis sueños.

A mis padres Carmen y Guido, quienes siempre estuvieron a mi lado apoyándome y a quienes siempre quiero hacer sentir orgullosos, muchas veces no existen las palabras para expresarlo pero en mi corazón siempre tienen el lugar más especial y reconozco que sin ustedes no sería la persona que soy.

A toda mi familia, pues todos compartieron momentos importantes en mi vida y compartieron conmigo experiencias que me sirvieron en mi diario vivir, a mis abuelos quienes con mucho amor están pendientes de mis logros, a mis primos con quienes he pasado momentos increíbles y con quienes crecí, a mis tíos quienes siempre me aconsejan en especial a mi tío Salvador Rivas a quien le tengo un especial aprecio, gracias por tener siempre el tiempo de cuidarme en mi niñez fue un segundo padre para mí, gracias por enseñarme sobre sus aficiones que luego llegaron a ser mías como el fútbol y los videojuegos.

A mis compañeros y amigos de la universidad, con los cuales recorrimos un camino lleno de momentos difíciles pero que cada uno de estos sirvió para unirnos apoyándonos unos a otros y siendo modelos a seguir para siempre querer mejorar, hago especial mención de mis más cercanos compañeros Gladis Elissa, Julio Moran, Isaac Rivera, Henry Alexis, Miguel Anzora, con quienes más experiencias compartí y quienes fueron motores en mi desarrollo personal en los momentos y materias que más exigieron de dedicación, estudio y constancia, tengan la seguridad que les tengo un gran aprecio y los respeto a todos y sé que son personas capaces de lograr mucho.

A Katherine Ramírez, Por todo su apoyo y amistad incondicional, siempre motivándome a dar mi máximo esfuerzo en todo lo que hacía y por ser la persona a quien siempre le he podido contar todo y pedir consejo, gracias por haber estado ahí siempre que te he necesitado, por integrarme a tu círculo de amigos y familia con quienes he pasado muchos momentos de alegría y de quienes he aprendido lo lindo que es ser espontaneo con los demás.

GERSON JAVIER FLORES RIVAS

AGRADECIMIENTOS

Es importante reconocer la incidencia que tiene Dios en mi vida, sin duda alguna él me ha guiado en cada decisión que he tomado.

Luego de que pasaban ideas en mi mente de niño, tuvo que salir la idea madura apoyada por Él, es así como sin saber lo que me esperaba decidí trazarme el reto de estudiar en la Universidad de El Salvador, la carrera de Ingeniería Civil. Mis padres que son fundamentales en mi vida, no influyeron en la decisión que tomé, incluso mi madre me decía que lo pensara, que buscara algo más accesible. Por otro lado, mi padre diciéndome que si estaba consciente de lo que estaba eligiendo. Sin embargo, confiaba plenamente, en que si me lo proponía y acompañado de la ayuda de Dios, era posible lograr esa meta.

Es por ello que los agradecimientos especiales son para:

Dios, por acompañarme siempre en mi vida, por permitirme cumplir esta meta y además, por permitirme tener lo necesario en mi época de estudiante.

Mi mamá Telma Aguilar, lo más importante que tengo en mi vida, lo que más aprecio. Si bien inicialmente me aconsejabas lo contrario a lo que yo quería, fuiste clave durante el proceso de estudio y no solo en esa faceta, sino, a lo largo de toda mi vida. Además, tus palabras, tus cariños, tus gestos, me hacían saber que no podía rendirme en los momentos críticos de la carrera y que debía luchar hasta el final.

Todo mi esfuerzo y mi dedicación es por vos, por ver una sonrisa en tu rostro y para que te sientas orgullosa de mí.

Mi papá Eliseo Morán, ya que siempre has estado pendiente de mí, gracias a vos nunca me faltó nada, siempre tuve lo necesario. Además, tus consejos también fueron importantes y me han servido para ser mejor persona.

A toda mi familia, tienen un papel importante en este triunfo, mi hermana Isis fundamental en el inicio de la carrera, mi tío Isidoro que desde niño ha sido como un padre para mí, a mi primo Hugo, prácticamente mi hermano, con vos empezó todo desde que fuimos compañeros en segundo grado hasta ser compañeros en el tercer año de universidad, a mi abuela y a todos mis demás tíos y tías en especial Balmore y Mercedes que en algún momento también me apoyaron cuando fue necesario, a mis primos que ante cualquier problema siempre estaban para ayudar, a los integrantes de la casa NASA, tío Gilo, Sergio, Franklin, siempre dispuestos a ayudar en lo que fuere, a Marvin que en el momento más crítico él estuvo para ayudarme. Además, agradecer a mis primos Sergio y Douglas que gracias a ellos conocí la facultad de Ingeniería y Arquitectura de la UES, inspirándome entonces a estudiar algo a fin.

A mi grupo de estudio: desde que inscribí en el grupo A7, conocí personas de calidad como Henry, Daniel, Hugo, Kenia, David, Luis, Gerson e Isaac, no tengo palabras para agradecer el buen grupo que generamos y que poco a poco se iba haciendo más grande, pero manteniéndonos siempre, poco a poco fui conociendo más gente importante en mi faceta de estudiante como Gladis apoyo fundamental para culminar la carrera. Además, cuando nos dividimos por las carreras que cada uno estudiaba el grupo fue complementado por Zamora, Reynaldo, Oscar, Miguel, Julio y Ángel. Sin duda alguna cada uno de los mencionados aportó su grano de arena para cumplir mi meta y la de los demás.

Esperando no dejar de lado a nadie y si lo hago mis disculpas, pero sepan todos que les agradezco de verdad su influencia en mi vida.

JULIO ERNESTO MORÁN AGUILAR

AGRADECIMIENTOS

A Dios todopoderoso, por darme la sabiduría y perseverancia para iniciar y culminar esta carrera.

A mis padres, a quienes les debo la vida, gracias por el gran sacrificio que han realizado para que pudiera cumplir una de mis metas, así como todo el amor, consejos y dedicación que hicieron que todo este proceso fuera una experiencia inigualable.

A mis compañeros, Gerson Flores por iluminarme con su conocimiento y dedicación al estudio y especialmente a Julio Morán por su ayuda incondicional en todos los ámbitos, por su paciencia y por los conocimientos transmitidos a lo largo de la carrera. Les agradezco muchísimo.

A mis asesores, Ing. Mauricio Valencia quien me instruyó con su conocimiento a través de los años fomentando mi interés por el área de pavimentos. Así también, por dedicarnos la guía y el tiempo necesario para realizar ésta investigación y por la oportunidad que me brindó de crecer profesionalmente. Al Ing. Dilber Sánchez que me enseñó los conocimientos fundamentales a lo largo de estos años y quien fue de gran apoyo para la culminación de este trabajo.

A mis compañeros, con quienes estudiamos arduamente durante todo este proceso, principalmente a Isaac, Reinaldo, Henry, Samayoa, Ángel, Miguel y Óscar con quienes compartimos muchísimas horas de estudio, desveladas y formamos una gran amistad les agradezco todo su conocimiento y ayuda

incondicional. También agradezco a mis amigos Axel, Evelio, Boris e Iván y a mis queridas amigas Patty, Karen y Yoli por su gran amistad.

A mi familia, a mi hermana, a K. que me acompañó en las desveladas de ciencias básicas. A mis primos Sandra, Andrea, Bobby, Stefany, Juan Pablo, Totto y especialmente a Humberto quien me inspiró a estudiar ingeniería civil en la mejor Facultad en la Universidad de El Salvador. De la misma manera, a mis queridos tíos y tías quienes me apoyaron de muchas maneras especialmente a mi tío Jorge que me tuvo mucha fe y con quien compartíamos el mismo gusto por la ingeniería.

GLADIS ELISSA VÁSQUEZ QUINTANILLA

ÍNDICE

ÍNDICE.....	XIV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XVII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XXV
INTRODUCCIÓN.....	XXVII
CAPITULO I: GENERALIDADES.....	2
1.1 ANTECEDENTES.....	2
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
1.3 OBJETIVOS.....	16
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	16
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
1.4 ALCANCES.....	17
1.5 LIMITACIONES.....	18
1.6 JUSTIFICACIÓN.....	19
CAPÍTULO II. GENERALIDADES DE LOS PAVIMENTOS RÍGIDOS.....	23
2.1 DEFINICIÓN DE PAVIMENTOS RÍGIDOS.....	23
2.2 TIPOS DE PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO.....	24
2.3 JUNTAS DE PAVIMENTO.....	28
2.4 SELLOS EN PAVIMENTOS.....	32

2.5 GEOMETRÍA DE SECCIÓN TRANSVERSAL DE UNA CARRETERA ...	33
2.6 SUBRASANTE	36
2.7 ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO RÍGIDO	41
2.8 SUBBASE.....	43
2.9 CAPA DE RODADURA	45
2.10 COMPORTAMIENTO DE LOS PAVIMENTOS.....	46
2.11 DETERIOROS EN LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO	48
2.12 DAÑOS EN ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS RIGIDOS.....	49
2.13 CONDICIONES DE SERVICIO DE LOS PAVIMENTOS RIGIDOS.....	77
CAPÍTULO III: MÉTODO DE DISEÑO AASHTO 93	80
3.1 GENERALIDADES DEL MÉTODO DE DISEÑO AASHTO 93	80
3.2 SOFTWARE DE DISEÑOS DE PAVIMENTOS RÍGIDOS BASADOS EN EL MÉTODO AASHTO 93.....	98
4.0 MODELOS DE EROSIÓN Y FATIGA	105
4.1 EROSIÓN EN PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO	105
4.1.2 DAÑOS CAUSADOS POR EROSION.....	109
4.2 FATIGA EN PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO	116
4.3 ESFUERZOS EN LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO	123

4.4 DESCRIPCIÓN DE LAS METODOLOGÍAS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO A IMPLEMENTAR.....	141
CAPÍTULO V.....	180
CAPÍTULO V: MODELOS PCA Y MEPCG.....	181
5.1 DESCRIPCIÓN DE LOS TRAMOS DE ESTUDIO.....	181
5.2 DETERMINACIÓN DE LOS ESFUERZOS EN LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO.	191
5.3 EVALUACIÓN DE DISEÑOS DE PAVIMENTOS RÍGIDOS.....	217
5.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS.	248
CAPITULO VI.....	253
CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	254
6.1 CONCLUSIONES.....	254
BIBLIOGRAFÍA.....	258
ANEXOS.....	260

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Configuración del pavimento para el análisis por fatiga.....	9
Figura 1.2 Configuración del pavimento para el análisis por erosión.....	11
Figura 2.1 Pavimento de concreto simple sin dovelas.	25
Figura 2.2 Pavimento de concreto simple con dovelas.....	26
Figura 2.3 Estructura de pavimento de concreto reforzado	27
Figura 2.4 Pavimento con refuerzo continuo	28
Figura 2.5. Cal & Mayor. (2007) Sección transversal típica mixta, pavimentada en recta. Ingeniería de Tránsito Fundamentos y Aplicaciones.	34
Figura 2.6 Capas del pavimento rígido.....	36
Figura 2.7 Esquema de la prueba de placa.	40
Figura 2.8. Elementos del pavimento rígido.....	41
Figura 2.9 Aspectos que obligan el uso de subbase.....	45
Figura 2.9 Fisura transversal Tramo II Interconexión.....	51
Figura 2.10 Fisuras longitudinales Interconexión tramo II.....	53
Figura 2.11 Sección de Grieta de esquina. Interconexión tramo II.	55
Figura 2.12 Losas Subdivididas Interconexión tramo II.	56
Figura 2.13 Fisuras en Bloque Interconexión tramo II.	58
Figura 2.14 Fisuras inducidas Boulevard Monseñor Romero	60
Figura 2.15 Levantamiento de losas en calle Pérez Escobosa, México. (Periódico local mexicano).....	61
Figura 2.16 Escalonamiento de Losas, 50 Av. Norte, San Salvador.....	62

Figura 2.17 Hundimiento en pavimento de concreto Interconexión tramo II.	64
Figura 2.18 Descascaramiento y Fisuras capilares Boulevard Orden de Malta.	65
Figura 2.19 Descascaramiento y Fisuras capilares Boulevard Orden de Malta.	65
Figura 2.20 Pulimiento de superficie.....	66
Figura 2.21 Pulimiento de superficie.....	67
Figura 2.22 Peladuras.....	68
Figura 2.23 Deficiencia en el sello de juntas entre losas adyacentes. (Boulevard Orden de Malta).....	71
Figura 2.24 Despostillamiento. (Boulevard Monseñor Romero tramo I).	73
Figura 3.1 Nomograma para determinación de valor de k.	89
Figura 3.2 Esquema prueba de carga. ARROYO, Nancy. Diseño y conservación de pavimentos rígidos.....	90
Figura 3.3 Aplicación de carga al centro del claro. ARROYO, Nancy. Diseño y conservación de pavimentos rígidos.....	92
Figura 3.4 Módulo de diseño estructural de pavimento rígido.	100
Figura 3.5 Menú principal del software WinPAS.....	102
Figura 4.1 Condiciones de la estructura del pavimento provocado por la acción del bombeo.	108
Figura 4.2 Sección de junta transversal, con deficiencia en el sello. Boulevard Orden de Malta: San Salvador.....	110
Figura 4.3 Sección de fisura transversal. Interconexión tramo I. San Salvador.	111

Figura 4.4 Sección de erosión por bombeo. Boulevard Orden de Malta. San Salvador.....	112
Figura 4.5 Sección de erosión por bombeo. Boulevard Orden de Malta. San Salvador.....	112
Figura 4.6 Sección de despostillamiento. Boulevard Orden de Malta. San Salvador.....	113
Figura 4.7 Sección de fisuras en bloque. Boulevard Orden de Malta. San Salvador.....	114
Figura 4.8 Escalonamiento en losa de concreto. 50 Av. Norte, San Salvador.	114
Figura 4.9 Sección de Grieta de esquina. Interconexión tramo II. San Salvador.	115
Figura 4.10 Grietas transversales. Interconexión tramo II. San Salvador.	120
Figura 4.11 Grieta longitudinal. Interconexión tramo I. San Salvador.	121
Figura 4.12 Fragmentación múltiple. Interconexión tramo I. San Salvador.....	122
Figura 4.13 Sección de grietas de esquina. Interconexión tramo I. San Salvador.	123
Figura 4.14 Esfuerzos en la esquina de la losa	124
Figura 4.15 Esfuerzos en la orilla de la losa.	125
Figura 4.16 Esfuerzos al centro de la losa.....	126
Figura 4.17 Superficie de rodamiento cóncava.....	127
Figura 4.18 Superficie de rodamiento convexo.....	128
Figura 4.19 Interfaz inicial del programa EverFe.	130

Figura 4.20 Pestaña Geometry del programa EverFe.	131
Figura 4.21 Pestaña "Material" del programa EverFe	132
Figura 4.22 Pestaña Loading del programa EverFe	133
Figura 4.23 Pestaña Dowel del programa EverFe	134
Figura 4.24 Pestaña Interlock del programa EverFe.....	135
Figura 4.25 Pestaña Meshing del programa EverFe.....	136
Figura 4.26 Ejecución del modelo en EverFe.	137
Figura 4.27 Resultados obtenidos a partir del software EverFe.	137
Figura 4.28 Interfaz del programa ApRIGID	138
Figura 4.29 Cuadro de resultados de ApRIGID	139
Figura 4.30 Listas de trabajo con extensión .txt.....	140
Figura 4.31 Interfaz principal de PCACálculo.	152
Figura 4.32. Módulos principales de PCACálculo.....	152
Figura 4.33 Parámetros de entrada y de salida en PCACálculo	156
Figura 4.34 Interfaz del análisis de sensibilidad.....	157
Figura 4.35 Gráficos del resultado de análisis de sensibilidad.....	158
Figura 4.36 Flujograma asociado al método mecanicista empírico.	162
Figura 4.37 Interfaz de usuario ME-CR Rigid 1.0	169
Figura 4.38 Interfaz del deterioro a analizar	170
Figura 4.39 Interfaz de respuestas del pavimento	172
Figura 4.40 Interfaz de tráfico en software ME-CR Rigid.....	173
Figura 4.41 Insertar datos referidos al clima	174

Figura 4.42 Ingreso de datos para las propiedades de la subrasante	175
Figura 4.43 Interfaz para las propiedades del concreto	176
Figura 4.44 Interfaz de configuración del pavimento y otros.....	177
Figura 4.45 Interfaz de salida de datos ME-CR Rigid.....	179
Figura 5.1 Esquema de ubicación de la prolongación Boulevard Orden de Malta, con 2.9 km	182
Figura 5.2 Detalle transversal y en planta de la estructura del pavimento Boulevard Orden de Malta.....	183
Figura 5.3 Esquema de ubicación Boulevard Monseñor Romero Tramo I.....	185
Figura 5.4 Detalle típico: Modulación de losas en tramos rectos.....	186
Figura 5.5 Ubicación del tramo II Interconexión.....	188
Figura 5.6 Sección típica de distribución de barras de transferencia de carga	189
Figura 5.7 Pesos máximos permisibles. Viceministerio de Transporte.....	192
Figura 5.8 Configuración de localización de ejes en el Borde	195
Figura 5.9 Configuración de localización de ejes en el Centro.....	195
Figura 5.10 Configuración de localización de ejes en la Esquina.....	195
Figura 5.11 Ingreso de datos en pestaña geometría.....	196
Figura 5.12 Ingreso de datos en pestaña materiales.....	197
Figura 5.13 Ingreso de datos en pestaña cargas.....	198
Figura 5.14 Ingreso de datos en pestaña dovela	199
Figura 5.15 Ingreso de datos en pestaña Interlock.....	200
Figura 5.16 Ingreso de datos en pestaña Mallado.....	201

Figura 5.17 Compilación del programa previa obtención de resultados.	202
Figura 5.18 Esfuerzos máximos principales.	203
Figura 5.19 Deformación de la configuración de losas debido principalmente al gradiente térmico positivo.	204
Figura 5.20 Deformación de la configuración de losas debido principalmente al gradiente térmico negativo.	204
Figura 5.21 Resultados de esfuerzos por puntos.	205
Figura 5.22 Resultados de esfuerzos en la superficie de la losa a través de mapas de color.	205
Figura 5.23 Resultados de esfuerzos en el fondo de la losa a través de mapas de color.	206
Figura 5.24 Configuración de la localización de ejes en el borde.	208
Figura 5.25 Configuración de la localización de ejes en el centro.	208
Figura 5.26. Configuración de la localización de ejes en la esquina.	208
Figura 5.27 Configuración de la localización de ejes en el borde.	210
Figura 5.28 Configuración de la localización de ejes en al centro.	210
Figura 5.29 Configuración de la localización de ejes en la esquina.	210
Figura 5.30 Ingreso de datos al software ApRigid 1.0.	214
Figura 5.31 Resultados proporcionados por el software ApRigid 1.0.	214
Figura 5.32 Ingreso de datos y cálculo con software PCAcalculo1.0.	219
Figura 5.33 Influencia del Módulo de reacción en erosión y fatiga.	221
Figura 5.34 Influencia del espesor de losa en erosión y fatiga.	221

Figura 5.35 Influencia del Módulo de ruptura en erosión y fatiga.	222
Figura 5.36 Ingreso de datos y cálculo con software PCAcalcula1.0.....	224
Figura 5.37 Influencia del módulo de reacción y Módulo de rotura en erosión y fatiga.	226
Figura 5.38 Influencia del espesor de losa en erosión y fatiga.	226
Figura 5.39 Ingreso de datos y calculo con software PCAcalcula1.0.....	229
Figura 5.40 Influencia del módulo de reacción y Módulo de rotura en erosión y fatiga.	231
Figura 5.41 Influencia del espesor de losa en erosión y fatiga.	231
Figura 5.43 Ingreso de datos en pestaña “Variables de desempeño”.....	235
Figura 5.44 Ingreso de datos en pestaña “Respuestas del pavimento”.	235
Figura 5.45 Ingreso de datos en pestaña “Tráfico”.	236
Figura 5.46 Ingreso de factores de ajuste horario y mensual con valores usuales.	237
Figura 5.47 Espectro de carga para el eje simple.....	238
Figura 5.48 Espectro de carga para el eje tándem.	238
Figura 5.49 Ingreso de datos en pestaña “Clima”.	239
Figura 5.50 Diferenciales de temperatura entre la superficie y la base de la losa.	239
Figura 5.51 Ingreso de datos en pestaña “Propiedades de la subrasante”.....	240
Figura 5.52 Ingreso de datos en pestaña “Propiedades del concreto”.....	241
Figura 5.53 Ingreso de datos en pestaña “Configuración del pavimento”.	241

Figura 5.54 Resultados desarrollo de grietas en el tiempo.	242
Figura 5.55 Soluciones cerradas de Westergaard (1926) y Quirós (2015).	243
Figura 5.56 Resultados desarrollo de grietas en el tiempo.	244
Figura 5.57 Resultados desarrollo de grietas en el tiempo.	245
Figura 5.58 Resultados desarrollo de grietas en el tiempo.	246
Figura 5.59 Resultados desarrollo de grietas en el tiempo.	247
Figura 5.60 resultados desarrollo de grietas en el tiempo.	248

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Clasificación de suelos SUCS.....	38
Tabla 2.2 Tipos de suelo de subrasante y valores aproximados de k.....	40
Tabla 2.3 Niveles de severidad para losas subdivididas.....	56
Tabla 2.4 Valores de serviciabilidad	78
Tabla 3.1 Periodo de diseño de las estructuras de pavimento.	82
Tabla 3.2 Límites de carga por eje.....	84
Tabla 3.3 Clasificación funcional de la carretera. AASHTO 93.....	85
Tabla 3.4 Índice de serviciabilidad final, AASHTO 1993.....	87
Tabla 3. 5 Valores de coeficiente de drenaje.....	93
Tabla 3.6 Transferencia de carga	95
Tabla 3.7 Pérdida de soporte.....	96
Tabla 4.1 Ejemplo de cálculo de daño acumulado por fatiga para una losa con un espesor propuesto de 20.5 cm.....	148
Tabla 4.2 Ejemplo de cálculo de daño acumulado por erosión para una losa con un espesor propuesto de 20.5 cm.....	150
Tabla 5.1 Parámetros de diseño de la estructura del pavimento Boulevard Orden de Malta.	184
Tabla 5.2 Parámetros de diseño de la estructura del pavimento Boulevard Monseñor Romero tramo I.	187

Tabla 5.3 Parámetros de diseño de la estructura del pavimento Interconexión tramo II.....	190
Tabla 5.4 <i>Diferenciales térmicos</i> . Revista ISCYC, tomo 73.....	194
Tabla 5.5 Valores de esfuerzos para tramo I Boulevard Monseñor Romero. .	207
Tabla 5.6 Valores de esfuerzos obtenidos para tramo I Boulevard Orden de Malta.....	209
Tabla 5.7 Valores de esfuerzos obtenidos para tramo II Interconexión.....	211
Tabla 5.8 Resultados de esfuerzos máximos y esfuerzos promedio obtenidos en los distintos tramos en estudio.....	212
Tabla 5.9 Valores de esfuerzo obtenidos a través del software ApRigid 1.0 ..	215
Tabla 5.10 Valores de esfuerzo obtenidos a través del software ApRigid 1.0 para los tramos en estudio.....	216
Tabla 5.11 Comparación de esfuerzos EverFe y ApRigid.....	217
Tabla 5.12 Repeticiones esperadas Tramo I Boulevard Monseñor Romero...	223
Tabla 5.13 Repeticiones esperadas prolongación Boulevard Orden de Malta y Ampliación Calle Huizúcar Tramo II.....	228
Tabla 5.14 Repeticiones esperadas Interconexión Nejapa – Apopa -Troncal del Norte, tramo II.....	232
Tabla 5.15 Módulos de ruptura para cada tramo en estudio.....	249
Tabla 5.16 Comparación de esfuerzos máximos y promedios con el 50% del MR.....	250

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se desarrolla el contenido del tema “EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO A SOLICITACIONES DE EROSIÓN Y FATIGA DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO DE CONCRETO HIDRAULICO REALIZADOS MEDIANTE LA GUIA DE DISEÑO AASHTO 93 EN EL SALVADOR”, en el cual se expone la verificación de la estructura de los pavimentos rígidos diseñados con el método AASHTO 93 en las carreteras de El Salvador, realizando un análisis de los parámetros de diseño que inciden en el deterioro del pavimento, examinando exhaustiva y específicamente los parámetros de erosión y fatiga.

Por otro lado, dentro de la problemática que surge en la red vial nacional, están los deterioros prematuros de los pavimentos rígidos, siendo éstos provocados principalmente por las cargas no constantes que realizan los vehículos automotores. Por lo que se establece realizar la verificación de los parámetros de erosión y fatiga por los métodos PCA y MEPDG en los pavimentos diseñados con el método AASHTO 93, ya que este método no toma en consideración los criterios de erosión y fatiga en su análisis.

Basándonos en los informes de diseños de pavimentos rígidos proporcionados por el MOP a través de la UAIP (Unidad de Acceso a la Información Pública), de los pavimentos que se encuentran dentro de la red vial salvadoreña que fueron diseñados por el método AASHTO 93, desarrollaremos el análisis de las variables

que inciden en el deterioro de los pavimentos por causa de las cargas impuestas de los vehículos, las consideraciones de refuerzo en forma de barras de acero y las repeticiones de dichas cargas sobre las losas, determinando así los esfuerzos a los que está sometida la capa de rodadura y subbase del pavimento mediante los software EverFe y Ap-Rigid 1.0.

Posteriormente, se determinarán las sollicitaciones de erosión y fatiga por medio de los métodos PCA y MEPDG, a partir de los parámetros de diseño AASHTO 93 con el fin de predecir el comportamiento del pavimento a corto y largo plazo de esta manera será posible determinar los efectos que inciden principalmente en la generación de los esfuerzos aplicados sobre las losas de concreto, y la influencia misma de los elementos del pavimento tales como las barras de amarre, dovelas y materiales utilizados, esto se conseguirá modelando los informes obtenidos mediante los software ME-CR Rigid, y PCA calculo proporcionando recomendaciones para el cumplimiento de los parámetros antes mencionados si los tramos modelados no cumplieran con las sollicitaciones de erosión y fatiga.

CAPÍTULO I

CAPITULO I: GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

Los diseños de los pavimentos de concreto hidráulico en El Salvador han mejorado a través del tiempo a partir de la experiencia, la investigación, las pruebas y los métodos de diseños que permiten mejorar su desempeño a largo plazo, disminuyendo los costos de mantenimiento y rehabilitación, impactando directamente en la economía y en el tiempo de traslado de los usuarios. En la actualidad el método de diseño empleado en El Salvador es el AASHTO 93 basado en el concepto de serviciabilidad.

A lo largo del tiempo, el crecimiento y desarrollo de la población ha exigido que se adopten métodos de diseño para la construcción de pavimentos. A partir de estas necesidades se desarrolla en 1960 en Illinois una investigación basada en el estudio de un tramo de prueba diseñada bajo el desarrollo de tablas, gráficos y fórmulas, representando el deterioro y demanda en dicho tramo.

La investigación continuó en desarrollo dando como resultado el Método AASHTO-72 el cual se mantuvo hasta mediados del año 1983, cuando se determinó que, aun cuando el procedimiento que se aplicaba alcanzaba sus objetivos básicos, podían incorporársele algunos de los adelantos logrados en los análisis. Por esta razón, en el período 1984-1985 el Subcomité de Diseño de Pavimentos junto con un grupo de Ingenieros Consultores comenzó a revisar el "Procedimiento Provisional para el Diseño de Pavimentos AASHTO-72", y a

finales del año 1986 concluye su trabajo con la publicación del nuevo "Manual de Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO '86", y sigue una nueva revisión en el año 1993, por lo cual, hoy en día el método se conoce como Método AASHTO-93.

En 1993 se desarrolla una versión mejorada del método AASHTO, utilizando criterios y parámetros específicos del tramo en estudio. El método AASHTO introduce el concepto de serviciabilidad en el diseño de pavimentos para mejorar la capacidad y el confort del usuario.

Los cambios más importantes para este año sucedidos en diferentes áreas del diseño son:

1. Incorporación de un "Factor de Confiabilidad" -fundamentado en un posible cambio del tráfico a lo largo del período de diseño.
2. Sustitución del Valor Soporte del Suelo (Si), por el Módulo Resiliente (Método de Ensayo AASHTO T274), el cual proporciona un procedimiento de laboratorio racional.
3. Empleo de los módulos resilientes para la determinación de los coeficientes estructurales.
4. Establecimiento de guías para la construcción de sistemas de sub-drenajes, y modificación de las ecuaciones de diseño.
5. Sustitución del "Factor Regional" el cual es un valor indudablemente bastante subjetivo por un enfoque más racional que toma en consideración los efectos de

las características ambientales tales como humedad y temperatura sobre las propiedades de los materiales.

La ecuación para el diseño de pavimentos rígidos del método AASHTO 93:

$$\log W_{18} = Z_R S_0 + 7.35 \log(D + 1) - 0.06 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5}\right)}{\frac{1.625 \times 10^7}{(D + 1)^{8.46}}}$$

$$+ (4.22 - 0.32 P_t) \log \left[\frac{S'_c C_d (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 J \left[D^{0.75} - \frac{18.42}{\left[\frac{E_c}{k}\right]^{0.25}} \right]} \right]$$

Donde:

W_{18} = Número de cargas de 18 kips (80 kN).

Z_R = Es el valor de Z (área bajo la curva de distribución) correspondiente a la curva estandarizada, para una confiabilidad R.

S_0 = Desvío estándar de todas las variables.

D = Espesor de la losa del pavimento en pulgadas.

ΔPSI = Pérdida de serviciabilidad prevista en el diseño.

P_t = Serviciabilidad final.

S'_c = Módulo de rotura del concreto en psi.

J = Coeficiente de transferencia de carga.

C_d = Coeficiente de drenaje.

E_c = Módulo de elasticidad del concreto, en psi.

K = Módulo de reacción de la subrasante (coeficiente de balastro), en pci.

Por otro lado, los pavimentos se clasifican en dos categorías, cuyo factor determinante es su reacción a las cargas a las que se ven sometidas. Los tipos de pavimentos pueden ser denominados como flexibles o rígidos. Los pavimentos flexibles y rígidos distribuyen las cargas recibidas del tránsito de diferentes maneras. La placa del pavimento rígido por su alta rigidez tiende a distribuir la carga sobre un área relativamente amplia de la subrasante.

Posteriormente a la aplicación del método AASHTO 93 surge la necesidad de ampliar la investigación en los pavimentos rígidos por lo que surge el suplemento AASHTO 98 el cual tuvo entre sus propósitos de mejorar y evaluar la caracterización de la sub base de apoyo de la estructura de pavimentos; el suplemento presenta pautas para la determinación de un valor de módulo de reacción de la subrasante (k) el cual debe ser adecuado en base a los ensayos de soporte de placas, y correlaciones con las propiedades de suelos, CBR o deflexiones medidas en pavimentos en servicio. De la misma manera, incorpora el diseño de juntas y un procedimiento en el que se evalúan las fallas en juntas.

El suplemento AASHTO 98 incorpora los siguientes cambios:

- Un nuevo modelo de tensión de la losa el cual se basa en la carga a la mitad de la losa, alabeo y las tensiones de deformación.
- Se agregaron nuevos lineamientos para determinar el valor de diseño k .

- Se realizan Consideraciones del espesor de la base, el módulo y la fricción de la interfaz en el cálculo de las tensiones en la losa.
- Consideración del espaciamiento de las juntas en las tensiones en la losa.
- Comprobación de la tensión de esquina para pavimentos sin dovelas.
- Comprobación del escalonamiento para pavimentos con dovelas y sin dovelas.

Existen métodos que además de tomar en cuenta todas las variables antes mencionadas, también toman en cuenta la erosión y fatiga, entre ellos se encuentran el método de la PCA (Portland Cement Association) y el método MEPDG (Guía de Diseño Mecanicista-Empírica para Estructuras de Pavimentos), dichos modelos simplifican el proceso de diseño y es por ello que son utilizados.

El método de diseño de la PCA (Portland Cement Association) es uno de los métodos más utilizados para el diseño de pavimentos de concreto. La PCA presentó inicialmente su método de diseño de pavimentos de concreto en el año 1933, el cual fue actualizado posteriormente en los años 1966 y 1984. Ésta última versión es conocida como el método PCA – 84 y sobre él se basa el software PCAcálculo_v.1.

Este método considera dos criterios de falla:

- a) El criterio de erosión de la sub base por debajo de las losas.
- b) El criterio del esfuerzo de fatiga.

El método MEPDG es el siguiente paso que dio la AASHTO en cuanto a metodologías de diseño. Es una herramienta de diseño y comprobación de estructuras de pavimentos, la cual ha cambiado la concepción utilizando criterios semi empíricos, dicho método no utiliza una ecuación de regresión para el diseño, sino recomienda la aplicación de la teórica elástica, modelando el medio mediante múltiples capas horizontales homogéneas. Además, establece valores admisibles para los resultados que evalúa:

- a) Deformaciones permanentes en la estructura.
- b) El agrietamiento por fatiga.
- c) El agrietamiento térmico, así como la predicción del índice de regularidad internacional (IRI).

Dentro de la problemática que surge en la red vial nacional, están los deterioros prematuros de los pavimentos rígidos, siendo éstos provocados principalmente por las cargas no constantes que realizan los vehículos automotores. Es por ello que se establece realizar la verificación de los parámetros de erosión y fatiga por método PCA y MEPDG en los pavimentos diseñados con el método AASHTO 93, ya que este método no toma en consideración los criterios de erosión y fatiga en su análisis.

La erosión de la base se genera debido a la acción del escalonamiento y bombeo, el cual consiste en el movimiento del agua situada debajo de la losa o su expulsión hacia la superficie como resultado de la presión generada por las

cargas a la que es sujeta la losa debido a muchas repeticiones de cargas de ejes pesados en las esquinas de la losa de concreto y bordes, erosión de subrasante, sub base y materiales del hombro, lo cual genera huecos bajo y junto a la losa. Es por eso que el criterio de erosión es utilizado para limitar la deflexión que se produce en los bordes de las losas de concreto, juntas y esquinas del pavimento.

La erosión se cuantifica en términos de porcentaje del daño total por erosión, se suelen optimizar los diseños obteniendo valores cercanos al 100%, ya que, si se tienen valores menores a dicho porcentaje, se estaría determinando una estructura sobre-diseñada. Por otro lado, el fenómeno de la fatiga consiste la falla por la repetición de cargas en puntos críticos de la losa de concreto, que si bien no son lo suficientemente grandes para que puedan causar una falla en una sola aplicación pueden producir esfuerzos excesivos, que generan agrietamientos futuros.

El método PCA establece una metodología para la evaluación de los parámetros de erosión y fatiga, la cual consiste en realizar la relación de esfuerzos obtenida por las diferentes sollicitaciones de cargas por ejes, comparándolas con las resistencias de diseño. A partir de dicha relación, se calculan las repeticiones permitidas para un rango de cargas y éste se compara con el número de repeticiones esperadas en el periodo de diseño.

El análisis por fatiga se realiza mediante la siguiente relación:

$$Dr = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_1}$$

Dr= Relación del daño acumulado en el período de diseño

m= total de grupos de carga

n_i = Número pronosticado de repeticiones del grupo de tráfico (cargas) "i"

N_i = Número de repeticiones de carga permisibles del grupo de carga "i"

El porcentaje obtenido no debe exceder el 100% se suman los daños provocados por cada tipo de eje de esto implica que los esfuerzos inducidos en la losa de concreto hidráulico se encuentran dentro de los límites aceptables.

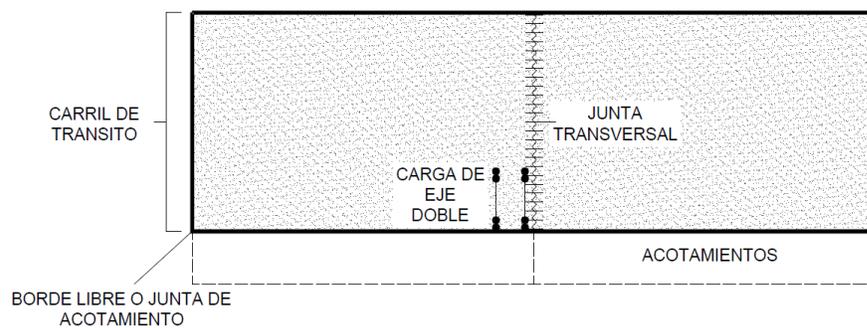


Figura 1.1 Configuración del pavimento para el análisis por fatiga.

De la misma manera, se realiza la revisión del parámetro de erosión utilizando la siguiente ecuación:

El método correlaciona:

Proporción de trabajo ————— Comportamiento

$$\frac{p \cdot w}{\text{Longitud del área deformada}}$$

p: presión en la interfase de la losa – superficie de apoyo

w: deflexión en la esquina

$$\text{Log } N = 14.524 - 6.777(C_1 P - 9.0)^{0.103}$$

N= Número de repeticiones permisibles para un índice de servicio presente de 3.0

$$P = \text{Proporción de trabajo o potencia} = 268.7 \frac{\rho^2}{h * k^{0.73}}$$

ρ = Presión sobre el apoyo de la esquina de la losa, en libras pulgada cuadrada

$\rho = kw$ = Caso de cimentación líquida (Winkler)

h= Espesor de la losa en pulgadas

k= Módulo de reacción del apoyo, en lb/pulg²

C₁= Factor de ajuste, 1 para sub bases sin tratar y 0.9 para sub bases estabilizadas.

La ecuación del daño por erosión es:

$$\text{Daño por erosión, (\%)} = 100 \sum_{i=1}^m \frac{C_2 n_i}{N_i}$$

$C_2 = 0.06$ pavimentos sin acotamientos

$C_2 = 0.94$ pavimentos con acotamientos sujetos

La ecuación anterior suma los porcentajes de daño de cada tipo de eje, presentando un resultado final inferior al 100 %. El criterio de erosión limita los efectos obtenidos por la deflexión en el pavimento en las esquinas y zonas críticas producto de la erosionabilidad de la capa de apoyo.

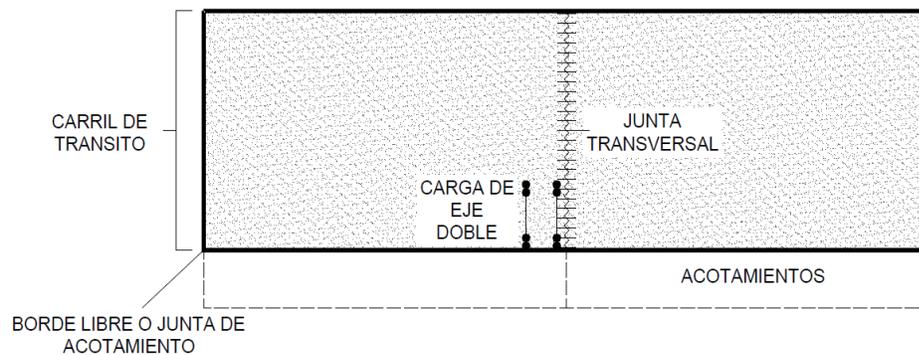


Figura 1.2 Configuración del pavimento para el análisis por erosión.

Al ser controlados dichos parámetros y siendo analizados por método PCA o MEPDG se está anticipando la ocurrencia del deterioro del pavimento por dichas solicitaciones que surgen de las cargas propias del tránsito sobre la estructura, las cuales pueden ser intervenidas con antelación a que el daño sea irreversible.

Esto logrará establecer la erosión y fatiga como parámetros de entrada en los criterios de diseño, garantizando así el mejor desempeño posible y sentando un precedente para la realización de futuros proyectos.

Uno de los programas más utilizados para el diseño de la estructura de pavimentos rígidos en otros países, es PCAcálculo_v.1, por otro lado se pueden mencionar software que han sido desarrollados involucrando metodologías con carácter mecanicista-empírico como son los desarrollados por LANAMME (laboratorio nacional de materiales y modelos estructurales), entre ellos podemos mencionar el ME-CR Rigid 1.0 que contempla la introducción de valores típicos y correlaciones de propiedades de materiales, datos de clima y tránsito, modelos de respuestas mecánicas y modelos de deterioro de pavimento desarrollados para Costa Rica. A partir de la necesidad de obtener los esfuerzos sobre las estructuras de pavimento para poder realizar los modelos de pavimentos, se crean software como el EverFE y por parte de LANAMME el ApRIGID 1.0, con los cuales es posible calcular los esfuerzos y deflexiones críticas de varias estructuras de pavimento de manera simultánea, mediante la incorporación de listas de trabajo. El programa incorpora algoritmos de cálculo para el uso de modelos regionales calibrados mediante técnicas de regresión lineal múltiple y de redes neurales artificiales validados estadísticamente para su uso en procesos de diseño. Este proyecto es parte de una serie de labores en desarrollo dentro Programa de Infraestructura del Transporte, del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, de la Universidad de Costa Rica.

La cual que se dirige a la definición de la Guía Mecanicista – Empírica de Diseño de Costa Rica. La información obtenida a partir de EverFE o el ApRIGID 1.0 constituye la base para la modelación de los criterios de erosión y fatiga, los cuales forman parte fundamental en la revisión de la estructura de pavimento rígido.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En El Salvador como en muchos otros países de América Latina, el diseño de pavimentos rígidos se realiza mediante métodos adoptados de otros países como el método AASHTO 93, que es el más utilizado en nuestro país. Estos métodos en muchas ocasiones son simplemente seleccionados y utilizados, lo cual es una de las causas del mal estado de muchas carreteras, estos métodos se utilizan debido a la poca investigación y a la falta de desarrollo de una guía de diseño propia y que se pueda implementar. Esta guía de diseño de pavimentos debería basarse en características de materiales, condiciones climáticas y a las cargas del tránsito, además de considerar las estrategias de conservación como la restauración, rehabilitación y reconstrucción.

El método AASHTO 93 utiliza como criterio de diseño la serviciabilidad para realizar los diseños de carreteras, esto deja de lado algunos criterios de gran influencia en pavimentos rígidos y causantes de las fallas en ellos. Estos criterios son la erosión en la subbase de la estructura del pavimento y la fatiga causada por la aplicación continua de ejes de carga producidos por los distintos tipos de vehículos.

Lo más adecuado sería avanzar y utilizar las últimas investigaciones en AASHTO, es decir, pasar del método AASHTO 93 el cual es empírico al método MEPDG el cual está basado en el principio empírico-mecanicista, ya que éste permitiría evaluar efectos de la variación de los materiales en el desempeño de

los pavimentos, una relación entre las especificaciones de los materiales, los procesos constructivos y el diseño estructural. Además, este nuevo método considera el envejecimiento de los materiales mes a mes a lo largo de la vida útil del proyecto. Esto resolvería una de las causas principales para las fallas prematuras en los pavimentos rígidos que es la dificultad de incorporar adecuadamente en los procedimientos de diseños la calidad de los materiales ya que éste no fue un parámetro considerado en la prueba de rodado AASHO de la cual descienden metodologías como la AASHTO 93 que utilizamos en El Salvador.

Por otro lado, existe otro enfoque al método AASHTO que proporciona la PCA, el cual tiene como criterios de diseño la erosión y fatiga. Éste a pesar de no ser el método más difundido en el país para el diseño de carreteras debido a las prácticas tradicionales que usan el AASHTO para los diseños, es el método que permitiría evaluar la erosión y fatiga teniendo estos criterios como principales. Es por estas razones que se vuelve una necesidad el verificar los diseños de estructuras de pavimentos rígidos diseñados por AASHTO 93 mediante modelos de erosión y fatiga sean estos PCA o MEPDG ya que permitirían incluir en el diseño criterios que el método AASHTO 93 no puede evaluar.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar el desempeño a solicitaciones de erosión y fatiga de pavimentos de concreto hidráulico realizados mediante la guía de diseño AASHTO 93 en El Salvador.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Obtener diseños de carreteras de pavimentos de concreto hidráulico diseñados mediante la metodología AASHTO 93 en El Salvador para ser verificados por modelos de erosión y fatiga.
- Determinar los esfuerzos producidos en losas de pavimentos de concreto hidráulico mediante el uso de los software EverFE y ApRIGID 1.0. de análisis de estructuras de carreteras.
- Verificar si los pavimentos de concreto hidráulico diseñados por el método AASHTO 93 en El Salvador cumplen con las solicitaciones de erosión y fatiga por los métodos de la PCA y el MEPDG.
- Comparar los resultados obtenidos de los criterios de erosión y fatiga por los métodos PCA y MEPDG.

1.4 ALCANCES

- Se obtendrán informes realizados por el MOP (Ministerio de Obras Publicas) de diseños de pavimento rígidos, a través de la UAIP (Unidad de Acceso a la Información Pública).
- De acuerdo con los informes realizados por el MOP y proporcionados por la UAIP se obtendrán esfuerzos que actúan sobre los pavimentos rígidos, por medio de los software EverFe y ApRIGID 1.0.
- A los pavimentos rígidos que han sido diseñados por medio del método AASHTO 93, se le realizarán evaluaciones de los parámetros erosión y fatiga por medio de los métodos PCA y MEPDG.
- Los métodos PCA y MEPDG serán utilizados para evaluar los parámetros de erosión y fatiga, con el fin de realizar una comparación de resultados y garantizar la sollicitación a dichos parámetros.

1.5 LIMITACIONES

- La investigación está restringida para que se evalúen los parámetros de erosión y fatiga en diseños de pavimentos rígidos realizados bajo el método AASHTO 93.
- El número de evaluaciones de los parámetros erosión y fatiga en diseños de pavimentos rígidos realizados bajo el método AASHTO 93, estará limitado por la información que sea brindada por la Unidad de Acceso a la Información Pública.
- Las evaluaciones de los parámetros erosión y fatiga se podrán evaluar únicamente en pavimentos rígidos que tengan una edad de servicio menor a 20 años.
- Las evaluaciones de los parámetros erosión y fatiga se realizarán únicamente por medio de los software PCAcalcula_v.1 y ME-CR Rigid 1.0.

1.6 JUSTIFICACIÓN

En El Salvador, los problemas de falla y colapso de los pavimentos rígidos es una característica muy común y repetitiva a lo largo de la red vial. El deterioro por las tensiones y deflexiones generadas en las losas de concreto evidencian un fenómeno de daño provocado por la fatiga y erosión en el elemento estructural. Hasta julio de 2018 el Registro Público de Vehículos Automotores del Viceministerio de Transporte (VMT) reportó 1.141.552 vehículos en todo el país, dicho número sigue en aumento. Es por ello, que los diseños de pavimentos no solo se limitan al correcto diseño de la capacidad de carga de la estructura, sino que también a estrategias de conservación a lo largo de su vida útil. Debido a esto se debe tomar especial importancia a los fenómenos que puedan ocasionar fallas en las estructuras viales, tales como la erosión y la fatiga.

La erosión de la subbase trae consigo la pérdida de cimiento bajo la sección de la losa, ocasionando desplazamiento vertical debido a las cargas del tránsito. Las intensas lluvias que se presentan en la época de invierno provocan que el agua ingrese en las oquedades entre el suelo y la estructura del pavimento, generando el fenómeno conocido como bombeo el cual contribuye al deterioro de escalonamiento y fractura de las esquinas.

El fenómeno de fatiga en el pavimento rígido es producido por las aplicaciones de carga no constantes y las acciones desiguales que se dan a lo largo de las carreteras por parte del tránsito, dicho comportamiento genera fallas en las

estructuras de pavimento, ocasionando inestabilidad y pérdida de confort a los usuarios que transitan en ellas. La aplicación de esfuerzos repetitivos en las mediaciones y bordes de la losa provocan fisuras en las esquinas de las losas y deterioro, generando también agrietamiento transversal orientado de forma perpendicular al eje de la carretera, dividiendo la losa en dos planos. Los principales factores que se pueden atribuir a dicho fenómeno consisten en el número de aplicaciones de carga, el espesor de la losa, espaciamiento entre juntas transversales, aditivos, tiempo de curado y edad del concreto, resistencia y módulo de rotura. Todos estos factores de diseño son requeridos en el método AASHTO 93. Sin embargo, en la actualidad no se cuenta con un complemento a este método que satisfaga la necesidad de la verificación de erosión y fatiga requerida para un buen desempeño de la estructura vial.

La importancia de realizar la revisión de los parámetros de erosión y fatiga en los pavimentos rígidos por medio de metodologías establecidas es que se podrá realizar verificación del cumplimiento de dichos fenómenos con todos aquellos pavimentos de concreto hidráulico que han sido diseñados con AASHTO 93.

Al evaluar dichos criterios, estos podrán ser requeridos en las especificaciones contractuales de los proyectos viales a desarrollar, sirviendo como complemento para el método de diseño AASHTO 93 y garantizando así una forma de prevenir colapsos en losas antes de lo proyectado en las actividades de conservación de los pavimentos, alargando su vida útil, mejorando la experiencia de los usuarios al transitar por las vías y disminuyendo en gastos de reparación de vehículos.

La investigación tiene como propósito presentar una metodología que sirva como base para instituciones privadas y gubernamentales que realizan y dan mantenimiento a los pavimentos rígidos de El Salvador, la cuales utilizan la metodología AASHTO 93 para la realización de diseños de estructuras de pavimento de concreto hidráulico, como es el caso del Ministerio de Obras Públicas, con el objetivo de revisar la solicitación de los parámetros de erosión y fatiga en dichos pavimentos bajo una metodología verídica y adaptada a las condiciones nacionales, asegurando así que las estructuras rígidas no fallen debido a estos factores y se prediga su comportamiento a lo largo de su vida útil.

CAPÍTULO

II

CAPÍTULO II. GENERALIDADES DE LOS PAVIMENTOS RÍGIDOS

2.1 DEFINICIÓN DE PAVIMENTOS RÍGIDOS

Se puede definir pavimentos rígidos a todos aquellos pavimentos que están constituidos fundamentalmente por una losa de concreto hidráulico, la cual puede estar apoyada sobre la subrasante o sobre una capa de material seleccionado, la cual se denomina subbase del pavimento rígido.

Los pavimentos reciben el nombre “rígido” debido a las propiedades del concreto las cuales absorben en mayor grado las cargas vehiculares además de distribuir las de una manera más eficiente, también, es necesario resaltar que debido a esa alta rigidez se requieren en su estructura un menor número de capas granulares entre la carpeta de rodadura y la subrasante.

Este tipo de pavimento no puede deformarse hacia las capas inferiores sin que se presente la falla estructural y tiene un costo inicial más elevado que el flexible y su periodo de vida varía entre 20 y 40 años, pero el mantenimiento que requiere es mínimo y solo se efectúa (comúnmente) en las juntas de las losas.

Aunque teóricamente los pavimentos de concreto hidráulico pueden colocarse en forma directa sobre la subrasante, es necesario construir una capa de subbase para así evitar que los finos sean bombeados hacia la superficie de la capa de rodadura cuando los vehículos pasan y aplican cargas sobre el pavimento, lo cual puede provocar fallas en las losas.

2.2 TIPOS DE PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO

Los tipos de pavimentos de concreto se pueden clasificar en orden de menor a mayor costo inicial:

- Pavimentos de concreto simple.
 - ✓ Sin dovelas.
 - ✓ Con dovelas.
- Pavimentos de concreto reforzado con juntas.
- Pavimentos de concreto con refuerzo continuo.

A continuación, se describen cada uno de los tipos de pavimentos de concreto hidráulico:

2.2.1 PAVIMENTOS DE CONCRETO SIMPLE:

Sin dovelas:

Son aquellos pavimentos que no presentan refuerzo de acero ni elementos para transferencia de cargas, esta transferencia se logra a través de la trabazón de los agregados entre las caras agrietadas debajo de las juntas. Para que la transferencia sea efectiva, es necesario que se use un espaciamiento corto entre juntas. Estos están constituidos por losas de dimensiones relativamente pequeñas, en general son menores de 6 m de largo y 3.5 m de ancho. Los espesores de estos pavimentos varían en función al uso que se le dará. Por ejemplo, para calles de urbanizaciones residenciales, éstos varían entre 10 y 15

cm, en carreteras se obtienen espesores de 16 cm, en aeropistas y autopistas 20 cm o más.

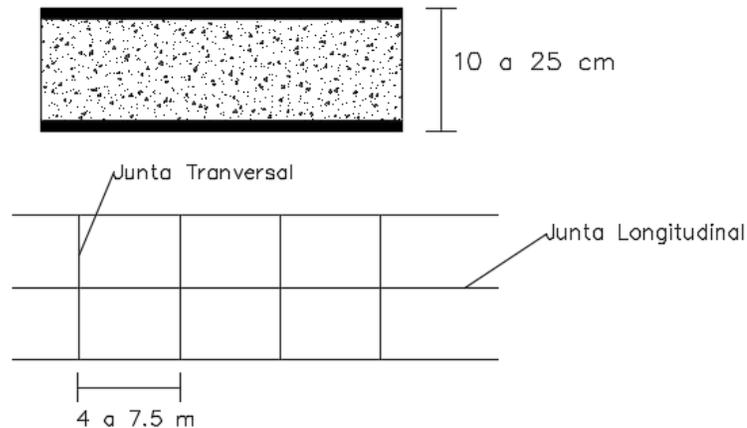


Figura 2.1 Pavimento de concreto simple sin dovelas.

Con dovelas:

Son barras de acero liso, que se colocan en la sección transversal del pavimento específicamente en las juntas transversales. Su función estructural es la de transmitir las cargas de una losa a la losa contigua, de esta forma se evita el escalonamiento. Según la Asociación de Cemento Portland este tipo de pavimento es recomendable para tráfico diario que exceda los 500 ESALs (Número de repeticiones de ejes simples equivalentes a 18 kips), con espesores de 15 cm o más.

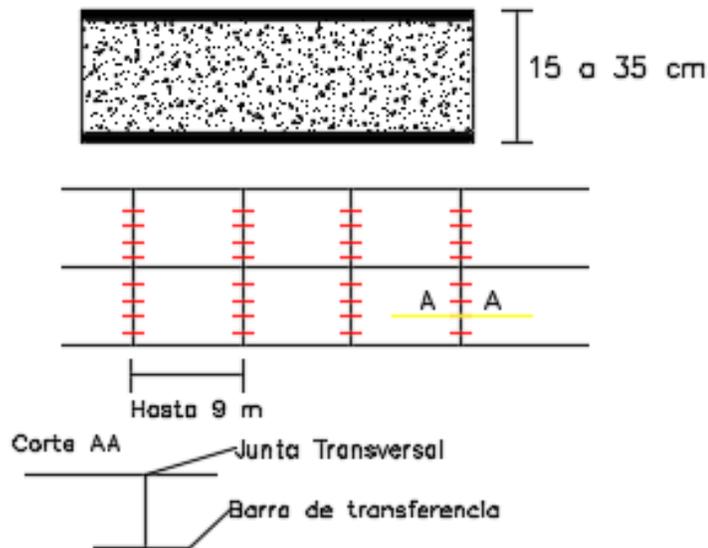


Figura 2.2 Pavimento de concreto simple con dovelas.

2.2.2 PAVIMENTOS DE CONCRETO REFORZADO CON JUNTAS.

Se llaman pavimentos reforzados con juntas aquellos que contienen además del refuerzo, dovelas para la transferencia de carga en las juntas transversales. Este refuerzo puede ser colocado en forma de mallas de barras de acero o acero electrosoldado. El objetivo que tiene la armadura que se coloca es la de evitar las grietas que pueden llegar a formarse, con el fin de lograr una adecuada transferencia de cargas entre las losas y de esta manera conseguir que el pavimento se comporte como una unidad estructural.

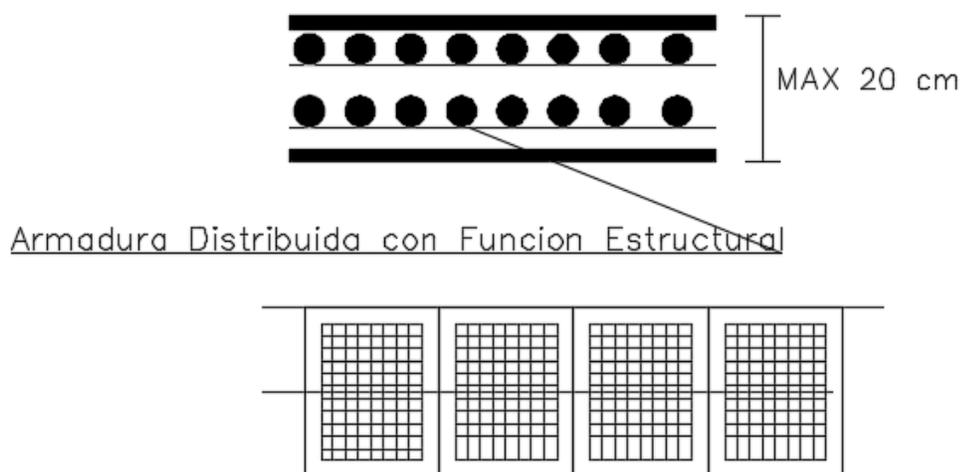


Figura 2.3 Estructura de pavimento de concreto reforzado

2.2.3 PAVIMENTOS DE CONCRETO CON REFUERZO CONTINUO

Son aquellos que a diferencia de los pavimentos de concreto reforzado con juntas, se construyen sin juntas de contracción, esto debido a que el refuerzo es el que absorbe todas las deformaciones, específicamente las de temperatura. El refuerzo principal de este tipo de pavimentos es el acero longitudinal, el cual se coloca a lo largo de toda la longitud del pavimento. El refuerzo transversal puede no ser requerido para este tipo de pavimentos.

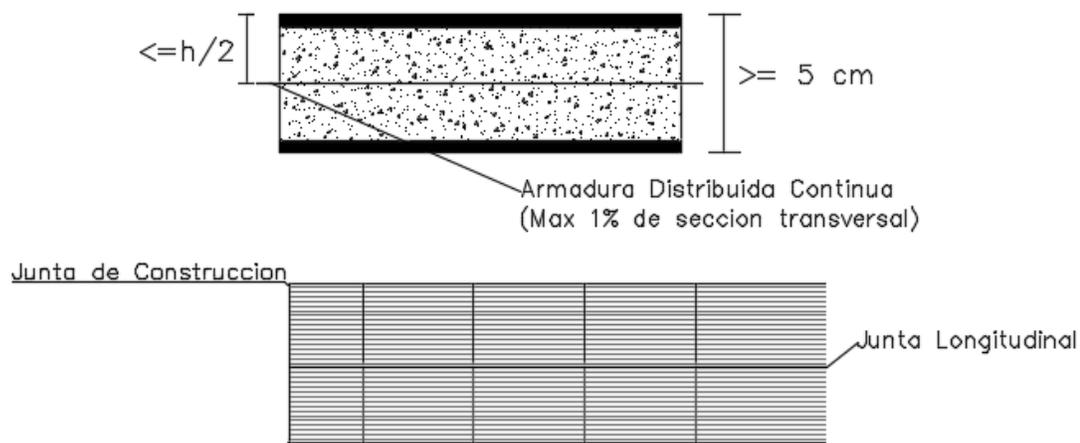


Figura 2.4 Pavimento con refuerzo continuo

2.3 JUNTAS DE PAVIMENTO

El diseño de las juntas que deben realizarse en los pavimentos de concreto, es una parte integrante del sistema estructural, ya que sus características (espaciamiento, tipo, dimensiones, barras, sellos) son factores importantes a considerar con relación a las tensiones de la losa y la durabilidad del pavimento y por lo que condicionan su diseño y comportamiento en servicio.

El proceso constructivo de las juntas en las losas de concreto hidráulico conlleva una serie de pasos y tiempos que deben respetarse para que ellas trabajen de forma adecuada y cumplan con los requisitos de diseño. Los principales daños en los pavimentos rígidos se producen a partir de juntas que no cumplen su función debido al deficiente proceso constructivo. Es por ello, que el proceso da inicio después del curado de las losas, en donde se procederá al corte de las juntas transversales y longitudinales con discos abrasivos si se realizan los cortes

en seco, o con discos de diamante enfriados con agua. El corte de las juntas deberá comenzar por las transversales de contracción y continuar con las longitudinales. El corte se realizará cuando el concreto presente las condiciones de endurecimiento propicias para su favorable ejecución y antes de que se produzcan agrietamientos no controlados. Una vez comenzado el corte deberá continuarse hasta finalizar todas las juntas. El inicio de los trabajos deberá iniciar entre las 4 ó 6 horas de haber colocado el concreto y deberá terminar antes de 12 horas después del colado.

Toda materia extraña que se encuentre dentro de las juntas deberá extraerse mediante agua a presión, chorro de arena y aire a presión los cuales deberán ser aplicados siempre en una misma dirección. El uso de este procedimiento deberá garantizar la limpieza total de la junta y la eliminación de todos los residuos del corte. Finalmente, se procede a colocar el respectivo material de sello sobre la junta para evitar infiltraciones de agua en las capas inferiores y consecuentemente prevenir daños en la estructura.

Para que las losas de concreto trabajen de forma eficiente se deben distinguir los siguientes tipos de juntas:

- Juntas longitudinales.
- Juntas transversales de dilatación.
- Juntas transversales de contracción.
- Juntas transversales de construcción.

2.3.1 JUNTAS LONGITUDINALES

Las juntas longitudinales tienen como principal objetivo limitar el ancho de la franja de concreto de manera de evitar la formación de grietas en el sentido longitudinal. Estas juntas se producen principalmente en la unión de dos calzadas de pavimento las que pueden tener bombeo en direcciones distintas, en estas juntas se emplean barras circulares de acero corrugado, denominadas “barras de amarre” para mantener las losas juntas, esto debido a que los excesos de expansión y contracción pueden producir la separación o abertura de la junta permitiendo el paso del agua.

2.3.2 JUNTAS TRANSVERSALES DE DILATACIÓN.

Las juntas de dilatación se consideran como el elemento más débil del pavimento, y es donde más frecuentemente se presenta el fenómeno de erosión. Estas juntas pueden fallar, ya sea porque entran elementos extraños en ellas que las traban en expansión, o porque están muy separadas unas de otras provocando que las expansiones en estas juntas sean superiores al ancho de separación de la junta, y por lo tanto las losas pueden comenzar a levantarse por compresión entre ellas, por lo que para su correcta construcción es necesario rellenar las juntas con un material que sea adecuado para hacerla impermeable, entre ellos se pueden mencionar prefabricados, como fieltro, corcho o fibra de madera impregnados con materiales bituminosos, así como caucho.

2.3.3 JUNTAS TRANSVERSALES DE CONTRACCIÓN.

Son aquellas que tienen como función principal la de controlar la formación de grietas y/o fisuras derivadas de la contracción del concreto en su proceso de endurecimiento, además de controlar el efecto del alabeo de las losas en el sentido longitudinal. Cuando una losa se contrae de forma uniforme por disminución en su temperatura media o de su contenido de humedad aparecen tensiones de tracción. Colocando las juntas transversales a distancias apropiadas, estas tensiones se reducen a límites admisibles de operación. Cabe mencionar que mientras menor es el espaciamiento de juntas menor es el efecto de la contracción del concreto sobre la losa y el alabeo.

2.3.4 JUNTAS TRANSVERSALES DE CONSTRUCCIÓN

Son aquellas que se forman cuando se ejecuta una interrupción planificada en la pavimentación en el sentido de avance longitudinal del mismo, conocidas como juntas frías de concreto, normalmente se realizan en lugares donde coincida con una junta de contracción y como en ese punto está ubicada la unión de concreto antiguo y nuevo, en todo el espesor se colocan barras para reponer la capacidad de traspaso de carga en esa junta y poder absorber el efecto de la falta de transferencia de carga que deterioran las losas.

2.4 SELLOS EN PAVIMENTOS

La función principal de los selladores de juntas es el de minimizar la infiltración de agua en la estructura del pavimento y evitar la entrada de materiales dentro de las juntas que pueden causar la rotura de éstas.

Para una adecuada selección del sello se deben considerar varios aspectos entre ellos su vida útil esperada, el tipo de sello, tipo de junta, datos climáticos y el costo de control de tránsito en cada aplicación del sello, en todo el período económico de análisis además de que el tipo de junta es muy influyente en la selección del material de sello, por ejemplo, las juntas longitudinales entre losas o en la unión berma-losa no generan las mismas tensiones sobre los sellos que ejercen las juntas transversales, debido a que sus movimientos son considerablemente menores.

Los materiales de sellos de juntas de pavimentos de concreto, deben reunir las siguientes características:

- Impermeabilidad
- Resistencia
- Deformabilidad
- Estable
- Resiliencia
- Durabilidad
- Adherencia

Debido a las características que presentan los sellos de juntas los tipos de sellos más utilizados son:

2.4.1 SELLOS LÍQUIDOS

Los sellos líquidos pueden ser de diferentes materiales entre ellos asfalto, caucho colocado en caliente, compuestos elastoméricos, siliconas y polímeros, estos materiales son colocados en las juntas en forma líquida, permitiéndoles fraguar. Cabe mencionar que son diseñados para soportar esfuerzos de tensión y compresión.

2.4.2 SELLOS ELASTOMÉRICOS PREFORMADOS

Son sellos de neopreno extruido que tienen redes internas que ejercen una fuerza hacia fuera contra las caras de la junta. Los sellos elastoméricos preformados a diferencia de los sellos líquidos solo se diseñan para esfuerzos de tensión.

2.5 GEOMETRÍA DE SECCIÓN TRANSVERSAL DE UNA CARRETERA

La sección transversal típica mixta de una carretera que está constituida de pavimento rígido es:

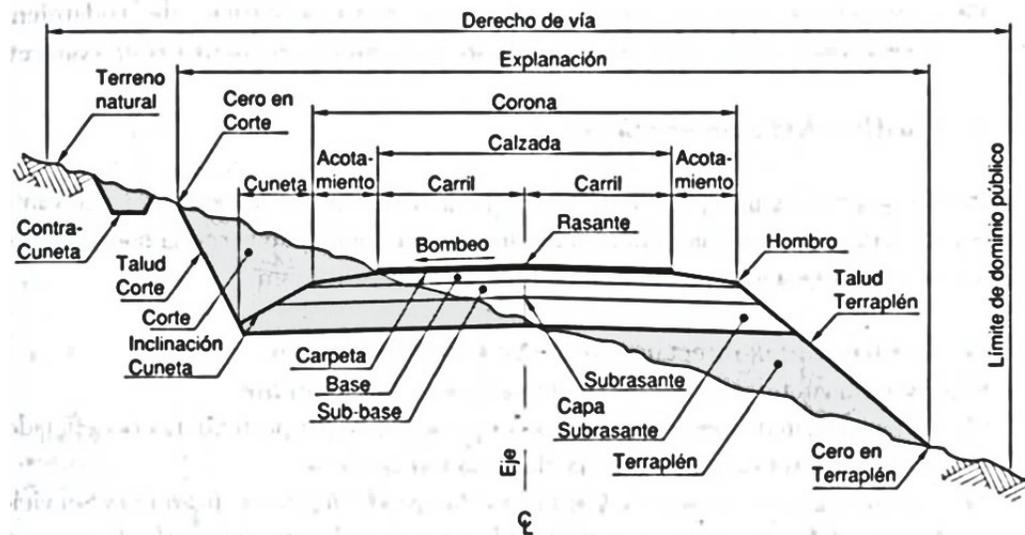


Figura 2.5. Cal & Mayor. (2007) *Sección transversal típica mixta, pavimentada en recta.*

Ingeniería de Tránsito Fundamentos y Aplicaciones.

A continuación, se describe cada uno de los elementos que se presentan en la sección transversal:

Calzada: Por calzada se entiende a la parte de la carretera destinada al tránsito de vehículos.

Carril: Es una parte de la calzada la cual tiene el ancho suficiente para que pueda transitar una fila de vehículos.

Acotamiento: Se encuentran en ambos extremos de la calzada, son fajas que se extienden a lo largo de una vía y eventualmente pueden ser utilizados como estacionamiento temporal para vehículos con desperfectos mecánicos o que presenten cualquier tipo de emergencia.

Corona: Es la parte terminada de una vía, la cual incluye la calzada y los acotamientos.

Hombro: Es el punto de intersección entre el talud proveniente del relleno y el extremo de la corona.

Cunetas: Están ubicadas paralelas a los acotamientos y son utilizadas para realizar el drenaje superficial longitudinal de la carretera.

Contracunetas: Sirven como auxilio a las cunetas en aquellas zonas de la carretera en la cual el flujo de agua pueda ser excesivo para la cuneta y así puede evitar la inundación de la carretera.

Taludes: Se definen como la parte de terreno inclinada en la cual se ha realizado corte conformada entre la línea de cero y el fondo de la cuneta; y donde se ha realizado relleno está comprendida entre la línea de cero y el hombro.

Línea de cero: Es aquel punto en el cual el corte o relleno se encuentran con el terreno natural.

Pendiente Transversal: En este caso que es una recta, está representada por el bombeo, y consiste en asignarle inclinación a la corona para poder realizar un drenaje eficiente.

Derecho de vía: Es el ancho de terreno que está destinado a la construcción, conservación, reconstrucción, ampliación y protección. En la parte comprendida en el derecho de vía no se podrá dar uso privado.

Explicación: Es el ancho total, comprendido entre las líneas de cero de ambos extremos.

Anteriormente se detallaron los elementos que contiene una sección transversal típica. Sin embargo, no han sido especificadas las capas que se consideran en la construcción de pavimentos rígidos.

El pavimento rígido está compuesto de tres capas: capa de rodadura, subbase y subrasante. Estas capas son colocadas en el siguiente orden:

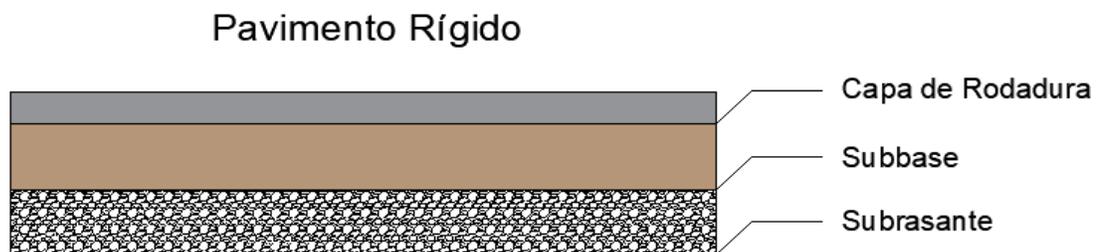


Figura 2.6 Capas del pavimento rígido

2.6 SUBRASANTE

La subrasante es el terreno donde está cimentado el pavimento, puede ser el suelo natural, cortado y compactado o en caso de tener un terreno natural deficiente será el material seleccionado de relleno el cual debe ser de buena calidad, debido a requerimientos del diseño geométrico. La función de la subrasante es dar un apoyo razonablemente uniforme, sin cambios bruscos en el valor de soporte, es decir, que es mucho más importante que la subrasante

brinde un apoyo uniforme a que tenga una alta capacidad, de hecho, de la calidad de la subrasante depende el espesor que tendrá el pavimento. Como parámetro de evaluación de la subrasante se emplea la capacidad de soporte o resistencia a la deformación por esfuerzos cortante bajo las cargas de tránsito.

Es necesario tener en consideración para una buena subrasante la sensibilidad del suelo a la humedad, tanto en lo referente a la resistencia como a las variaciones de volumen, ya sean por hinchamiento o por retracción. Los cambios de volumen de un suelo de subrasante expansivos pueden provocar graves daños en las estructuras que se apoyen sobre él, por lo que, al construir un pavimento sobre los suelos expansivos, tendrá que tomarse la precaución de impedir las variaciones de humedad del suelo para lo cual habrá que realizar la impermeabilización de la estructura. Otra forma de afrontar esa situación es mediante la estabilización de este tipo de suelo con algún aditivo, en el medio los mejores resultados se logran mediante la estabilización de suelos con cal y cemento.

Los materiales que se usan como subrasante deben ser preferentemente del tipo: GW, SW, SM, ML siempre que la porción fina es decir la arcilla, no sea de alta plasticidad, el material debe ser compactado del 95 al 100 % de la prueba de compactación AASHTO T-99, aunque en la actualidad la prueba más utilizada por las exigencias de subrasante más densas es la AASHTO T-180 para la construcción de aeropuertos o sitios donde haya exigencia debido a equipos

pesados. Cuando los materiales sean del tipo CL, MH, CH, CLML y cuando su límite líquido (LL), esté comprendido entre 50% y 100%, se analizará la posibilidad de mejorarlos, con la finalidad de reducir los valores del LL, y, en consecuencia, del LP (Limite plástico). Cuando el terreno de apoyo sea del tipo MH, CH y OH con LL = 100%, serán desechados como material de apoyo, además en todos los casos en que se encuentre material con alto contenido de materia orgánica se debe proceder a su sustitución total con material limoso mezclado con arena, grava o ambas.

Símbolo del grupo	Nombre del grupo
GW	Grava bien graduada
SW	Arena bien graduada
SM	Arena limosa
ML	Limo
CL	Arcilla
MH	Limo de alta plasticidad
CH	Arcilla de alta plasticidad
CLML	Arcilla limosa
OH	Arcilla orgánica o limo orgánico

Tabla 2.1 Clasificación de suelos SUCS.

Fuente: Sistema unificado de clasificación de suelos.

Cuando en el corte de suelos naturales afloran fragmentos de roca, éstos no serán admitidos como material de apoyo de ser así, se deberá proceder a la remoción de los fragmentos endurecidos.

La resistencia de la subrasante es considerada dentro del método AASHTO por medio del Módulo de Reacción de la subrasante k conocido también como coeficiente de balasto el cual se puede obtener directamente mediante la prueba de placa. El módulo de reacción la subrasante corresponde a la capacidad portante que tiene el terreno natural en donde se soportará el cuerpo del pavimento. El valor del módulo de reacción de la subrasante (k) se puede obtener directamente del terreno mediante la prueba de placa ASTM D1195 y D1196. Dado que la prueba de la placa es costosa y toma tiempo realizarla, el valor k es usualmente estimado por correlación a una prueba simple, tal como la Relación de Soporte de California (CBR). El resultado es válido ya que no se requiere una determinación exacta del valor de k ; las variaciones normales de un valor estimado no afectan significativamente los requerimientos de los espesores del pavimento, cuando se diseña un pavimento es probable que tenga diferentes valores de k a lo largo del tramo por diseñar, por lo que se recomienda utilizar el valor promedio de los módulos k para el diseño, teniendo en cuenta que este se puede incrementar al tomar la contribución de la subbase.



Figura 2.7 Esquema de la prueba de placa.

Si no se cuenta con información geotécnica del sitio se pueden hacer correlaciones mediante tablas que proporcionan órdenes de magnitud en los módulos de reacción de las capas de apoyo.

Tipo de Suelo	Soporte	Rango de valores de k (PCI)
Suelo de grano fino en el cual el tamaño de las partículas de limo y arcillo predominan.	Bajo	75-120
Arenas y mezclas de arena con gravas, con una cantidad considerable de limo y arcilla.	Medio	130-170
Arenas y mezclas de arena con grava, relativamente libre de finos.	Alto	180-220
Subbase tratada con cemento	Muy alto	250-400

Tabla 2.2 Tipos de suelo de subrasante y valores aproximados de k.

Fuente: Salazar Rodríguez Aurelio. Guía para diseño y construcción de pavimentos rígidos.

2.7 ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO RÍGIDO

De manera general los pavimentos están constituidos por conjuntos de capas superpuestas las cuales son relativamente horizontales, estos se diseñan y se construyen de forma técnica y con materiales apropiados los cuales deben estar adecuadamente compactados, es decir que son estructuras estratificadas que se apoyan sobre la subrasante de las vías, la cual se obtiene por movimientos de tierras en procesos de exploración, dichas estructuras también deben resistir adecuadamente los esfuerzos que cargas repetidas de tránsito le transmiten durante el periodo de diseño.

La estructura de pavimento rígido incluye otros componentes los cuales se muestran a continuación:

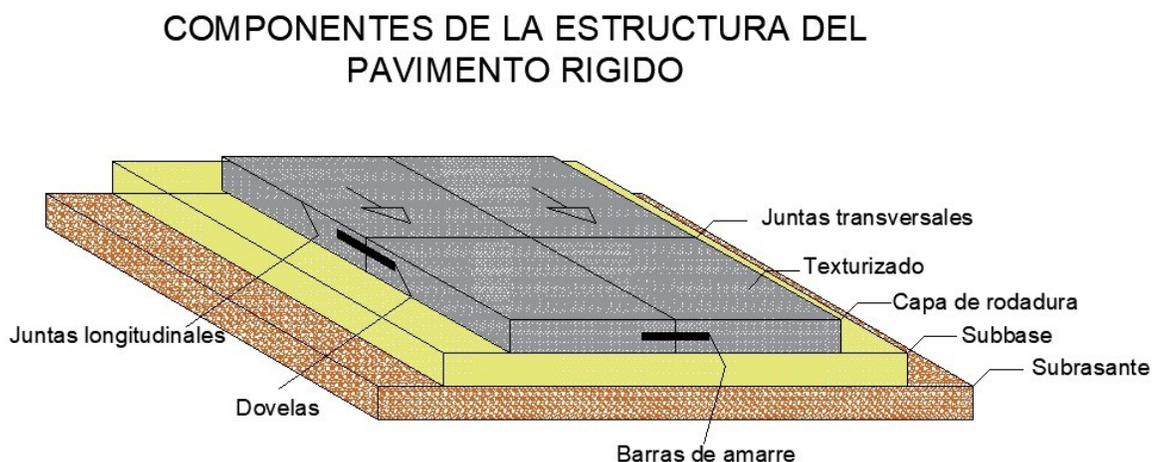


Figura 2.8. Elementos del pavimento rígido.

Es necesario describir cada uno de estos componentes debido a que a lo largo de la investigación serán retomados algunos de ellos. A continuación, se describen cada uno de los elementos que constituyen el pavimento rígido:

Juntas transversales y longitudinales: Este tipo de juntas se comenzaron a implementar a partir del apareamiento sucesivo de fisuras transversales y longitudinales, es por ello que al realizar las juntas tendrán la capacidad de controlar las fisuras por contracción del concreto.

Texturizado: El texturizado, es una técnica aplicada a los pavimentos rígidos, la cual consiste en implementar una textura a la superficie de concreto, dicha textura deberá ser capaz de provocar una resistencia suficiente al deslizamiento de neumáticos, además conservar un buen drenaje y escurrimiento superficial de líquidos, mantener el nivel bajo de ruido y sobre todo no debe afectar la resistencia al desgaste ni su durabilidad.

Barras de amarre: Son varillas de acero corrugado, las cuales están colocadas justamente en las juntas longitudinales del pavimento a una altura de la mitad del espesor, al colocar la barra de amarre se está garantizando que la junta longitudinal no se separe y además provee transferencia de carga entre losas adyacentes.

Dovelas: Se encuentran ubicadas justamente en las juntas transversales del pavimento a una altura de la mitad del espesor. Las dovelas generalmente son barras de acero lisas y con bordes redondeados. Las funciones principales son

las de transmitir las cargas impuestas en una losa hacia la losa subsecuente, y además permite la dilatación entre dichas losas.

2.8 SUBBASE

La subbase es una capa de materiales pétreos los cuales tienen buena graduación y que es construida sobre la subrasante. Esta capa, al igual que la subrasante debe cumplir con requerimientos de compactación y de calidad. Normalmente la subbase se construye para lograr espesores menores que la capa base cuando se requiera, en los pavimentos rígidos conviene colocar una capa subbase cuando las especificaciones para pavimento son más exigentes y su realización es obligatoria cuando la combinación de tipos de suelos, agua, y tránsito puedan generar bombeo.

La subbase está formada por capas de materiales granulares bien compactados. Por otro lado, pueden ser tratadas o estabilizadas con cemento Portland, como generalmente ocurre en El Salvador.

La capa de subbase consta de material selecto, que consistirá de ripio, tosca, rocalla, granito desintegrado, gravilla, piedra desintegrada u otros materiales similares. No deberá contener terrones de arcilla, materias vegetales ni otras sustancias objetables. Además del material selecto, esta capa deberá estar conformada por cemento portland y su respectiva cantidad de agua apropiada para lograr la compactación adecuada.

Los materiales de la subbase deben cumplir ciertos requisitos como: tamaño máximo, granulometría, plasticidad, equivalente de arena y valor relativo de soporte o CBR para proporcionar un adecuado espesor y calidad a la capa subbase.

Es importante aclarar que es necesario la realización de una subbase cuando exista riesgo de erosión por bombeo cuando se presenten en forma simultánea las siguientes condiciones:

- Repeticiones reiteradas de cargas pesadas capaces de generar deflexiones importantes en juntas y bordes de la calzada de concreto.

- Disponibilidad de agua en la interfase losa–subbase–hombro.

- Una subrasante compuesta por suelos finos o capaces de entrar en suspensión.

Cuando en un pavimento determinado se prevea la eventual coexistencia de estos factores el empleo de una subbase no erosionable es de carácter obligatorio.

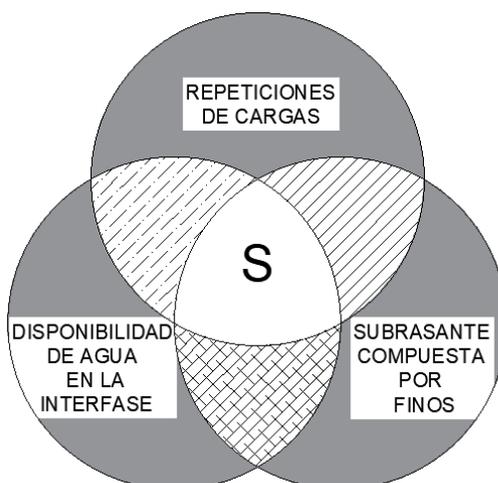


Figura 2.9 Aspectos que obligan el uso de subbase.

La función más importante de la subbase es impedir la acción del bombeo en las juntas, grietas y en los extremos de los pavimentos. Además, sirve como capa de transición y suministra un apoyo uniforme, estable y permanente del pavimento, facilitando los trabajos de pavimentación y mejora el drenaje, por lo que reduce por tanto al mínimo la acumulación de agua por debajo del pavimento. Por otro lado, ayuda a controlar los cambios volumétricos de la subrasante y disminuir al mínimo la acción superficial de tales cambios volumétricos sobre el pavimento, también ayuda a mejorar la capacidad de soporte de la subrasante.

2.9 CAPA DE RODADURA

Es la superficie de rodamiento la cual está constituida por materiales endurecidos para transferir los esfuerzos hacia la terracería de la estructura del pavimento.

Los materiales que componen la capa de rodadura pueden ser materiales granulares con o sin liga o más comúnmente de concreto hidráulico, en sus diferentes variantes. Constituye el área propiamente dicha por donde circulan los vehículos y peatones. La función esencial de la capa de rodadura es la de soportar y transmitir adecuadamente los esfuerzos que se apliquen, en el caso de los pavimentos de concreto hidráulico por su alta rigidez y alto módulo de elasticidad, basan su capacidad portante en la losa, más que en la capacidad de la subrasante, es decir, tiene un gran efecto repartidor de cargas, las cuales provienen de su peso propio y de las cargas que sobre ella circulan, por lo que la presión de contacto entre la losa y la subbase es solo una pequeña fracción de la carga superficial, efecto que se denomina usualmente como “acción de viga” de los pavimentos rígidos.

2.10 COMPORTAMIENTO DE LOS PAVIMENTOS

Los pavimentos en general presentan un determinado comportamiento producto de las solicitaciones de cargas para las cuales fueron diseñados en un periodo de tiempo específico. A lo largo del tiempo en servicio y a las repeticiones de carga sobre la estructura, la losa de concreto desgasta sus propiedades físicas en un ciclo en el que se pueden llegar a producir daños leves, moderados o graves, lo cual puede provocar la falla en los pavimentos, que al no ser debidamente tratada bajo medidas de conservación pueden ocasionar el colapso.

El comportamiento del pavimento puede manifestarse de manera estructural y funcional, teniendo la capacidad de ser percibidos principalmente por los usuarios de las vías quienes continuamente transitan por ellas.

El comportamiento estructural se refiere a la capacidad de las losas de concreto hidráulico de soportar las solicitaciones de cargas para las cuales fueron diseñadas. El fenómeno ocurre cuando las cargas del tránsito se distribuyen sobre las áreas de la losa, las cuales transmiten los esfuerzos producidos a las zonas de apoyo como la subbase y los bordes de las losas adyacentes.

Es por ello que una de las principales características propias de los pavimentos rígidos es la transferencia de cargas a través de las juntas de las losas, transmitiendo las cargas de una losa a otra. La capacidad estructural se determina por la deflexión a lo largo de las juntas y en el borde de los pavimentos, bajo una carga de referencia. Es conocido que las deflexiones excesivas sobre las losas producen el bombeo de la subbase que provoca la erosión de los materiales y la falla en las losas de concreto.

De la misma manera, cabe resaltar que el comportamiento estructural del pavimento depende de la correcta cuantificación de las solicitaciones de cargas de diseño ya que un exceso de éstas produciría el deterioro prematuro de la estructura.

Con respecto al comportamiento funcional del pavimento, éste implica la capacidad del pavimento de servir a los usuarios de manera cómoda, segura y

adecuada, enfocando su manifestación en las características físicas de la capa de rodadura, percibidas directamente por el usuario con factores como la textura, el peralte, radio de curvatura, la fricción superficial, las fisuras, las cuales se transmiten a la percepción del usuario a partir de la adherencia de la rueda con el pavimento y los efectos de las vibraciones debido a las condiciones físicas de la estructura.

Con respecto al comportamiento estructural y funcional se puede afirmar que están ligados entre sí, ya que el progresivo deterioro estructural del pavimento trae consigo disminución de la capacidad funcional del mismo deteriorándolo, que si no es tratado en su debido tiempo perderá su capacidad de soporte para el cual fue diseñado, provocando la falla en la estructura y aumentando el riesgo de generar desperfectos en los vehículos de los usuarios que transiten la vía.

2.11 DETERIOROS EN LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO

Los deterioros que pueden presentarse en las estructuras de los pavimentos dependen de muchos factores, entre los cuales los más significativos se deben al diseño, materiales y los procesos constructivos, así como a la falta de un plan de conservación ajustado al entorno actual y específico de El Salvador, provocando molestias en los usuarios, manifestados en la falta de comodidad, seguridad y aumento de los costos de mantenimiento. La capa de rodadura es la más expuesta al deterioro prematuro, ya que las cargas son impuestas directamente sobre ella, factores como el clima, las repeticiones continuas de

carga de los distintos tipos de vehículos, en conjunto con un mal plan de conservación aceleran su proceso de desgaste.

Luego de que la vía lleva tiempo considerable en uso se comienza a presentar el agudizamiento de las fallas que no han sido debidamente tratadas mediante un plan de mantenimiento eficaz y que, a raíz de las múltiples cargas y factores externos, se incrementan generando graves fallas que provocan molestias en los usuarios y deterioro excesivo de su estructura.

2.12 DAÑOS EN ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS RIGIDOS

En El Salvador, los daños en las estructuras de pavimentos son un problema actual y continuo a lo largo de toda la red vial, generando opiniones desfavorables entre los usuarios y afectando en la seguridad, comodidad y traslado, incrementando los costos que requiere la rehabilitación de los tramos que se encuentran en estados completamente deficientes. Las tipologías de daños más perceptibles y significativos de las estructuras de pavimento rígido abordados en el manual SIECA se detallan a continuación:

Fisuras transversales o diagonales

Descripción: Se refiere a una fractura de la losa que ocurre aproximadamente perpendicular al eje de la carretera, o en forma oblicua a este, dividiendo la misma en dos planos.

Posibles causas:

- Excesivas repeticiones de cargas pesadas.

- Deficiente apoyo de las losas.
- Asentamiento de la fundación.
- Excesiva relación longitud/ancho de la losa.
- Deficiencias en el proceso de construcción de las losas.
- Ausencia de juntas transversales.
- Variaciones en el espesor de losas.

Niveles de severidad:

B (Bajo)

- Fisuras finas, no activas, de ancho promedio menor de 3 mm.
- Fisuras selladas de cualquier ancho, con sello en condición satisfactoria; no hay signos visibles de despostillamiento o dislocamiento menor de 10 mm.

M (Mediano)

- Fisuras activas, de ancho promedio entre 3 y 10 mm.
- Fisuras de 10 mm de ancho con despostillamiento y/o dislocamiento menor de 10 mm.
- Fisuras selladas de cualquier ancho, con material de sello en condición insatisfactoria, despostillamiento o dislocamiento menor de 10 mm.

A (Alto)

- Fisuras activas de ancho promedio mayor de 10 mm.
- Fisuras selladas, con despostillamientos severos o dislocamiento mayor de 10 mm.

Medición: se puede medir en metros lineales o por losa.



Figura 2.9 Fisura transversal Tramo II Interconexión

Fisuras longitudinales

Descripción: Es una fractura de la losa que ocurre aproximadamente paralela al eje de la carretera, dividiendo la misma en dos planos.

Posibles causas:

- Excesivas repeticiones de cargas pesadas.
- Pérdida de soporte de la fundación.
- Gradientes de tensiones originados por cambios de temperatura y humedad.

- Deficiencias en el proceso de construcción de las losas o sus juntas longitudinales.
- Relación ancho / longitud excesiva

Niveles de severidad:

B (Bajo)

- Fisuras finas, no activas, de ancho promedio menor de 3 mm.
- Fisuras selladas de cualquier ancho, con sello en condición satisfactoria donde no hay signos visibles de despostillamiento o dislocamiento.

M (Mediano)

- Fisuras activas, de ancho promedio entre 3 y 10 mm.
- Fisuras de hasta 10 mm de ancho con despostillamiento y/o dislocamiento menor de 10 mm.
- Fisuras selladas de cualquier ancho, con material de sello en condición insatisfactoria, despostillamiento o dislocamiento menor de 10 mm.

A (Alto)

- Fisuras de ancho promedio mayor de 10 mm.
- Fisuras selladas o no, de cualquier ancho, con despostillamientos severos o dislocamiento mayor de 10 mm.

Medición: Se puede medir en metros lineales o por losa.



Figura 2.10 Fisuras longitudinales Interconexión tramo II

Fisuras de esquina

Descripción: Es una fractura que intercepta dos juntas unidas entre sí, generalmente forman un ángulo aproximado de 45° respecto a la dirección del tránsito y da una forma triangular en la esquina de la losa. La longitud de los lados menores de este triángulo será de 30 cm hasta la mitad del ancho (lado transversal).

Posibles causas:

- Excesivas repeticiones de cargas pesadas.
- Erosión de apoyo de la fundación.
- Deficiente transferencia de cargas a través de la junta.

Niveles de severidad:

B (Bajo)

- Fisuras finas, no activas, de ancho promedio menor de 3 mm.

- El área entre ésta y las juntas no se encuentra fisurado o bien hay alguna pequeña fisura.

M (Mediano)

- Fisuras activas, de ancho promedio entre 3 y 10 mm.
- El área entre ésta y las juntas se encuentra medianamente fisurada.

A (Alto)

- Fisuras de ancho promedio mayor de 10 mm.
- El área entre ésta y las juntas se encuentra muy fisurada o presenta hundimientos.

Medición: Es el total de metros lineales o número de fisuras, en función de las losas afectadas, así:

- Contiene una única fisura de esquina.
- Contiene más de una fisura del mismo nivel de severidad.
- Contiene dos o más fisuras de diferentes niveles de severidad, en este caso se registra el nivel de severidad correspondiente a la más desfavorable.

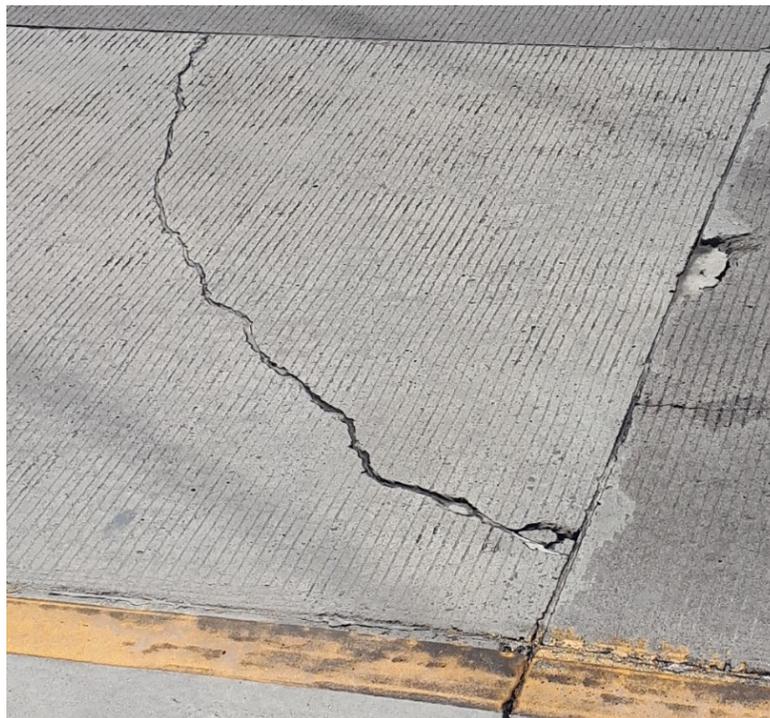


Figura 2.11 Sección de Grieta de esquina. Interconexión tramo II.

Losas subdivididas

Descripción: Es una fractura de la losa de concreto conformando una malla amplia, combinando fisuras longitudinales, transversales o diagonales.

Posibles causas:

- Fatiga del concreto, debido a las repeticiones de cargas pesadas.
- Deficiente apoyo de la fundación.

Niveles de severidad:

CLASE	NIVEL DE SEVERIDAD DE LA FISURA	No. DE PAÑOS EN QUE SE DIVIDE LA LOSA
B	Bajo	4-5
M	Mediano	6-8
A	Alto	>8

Tabla 2.3 Niveles de severidad para losas subdivididas.

Fuente: Manual para la inspección visual de pavimentos rígidos, Universidad Nacional de Colombia

Medición: Es el total de losas afectadas en un tramo o sección de carretera, así como su nivel de severidad.



Figura 2.12 Losas Subdivididas Interconexión tramo II.

Fisuras en bloque

Descripción: Es una fractura que subdivide generalmente una porción de la losa en paneles o bloques pequeños, que no cubren la totalidad del área de la losa.

Posibles causas:

- Fatiga del concreto, debido a las repeticiones de cargas pesadas.
- Equivocado diseño estructural.
- Deficiente apoyo de la fundación.

Niveles de severidad:

B (Bajo)

- Bloques definidos por fisuras de severidad baja; los planos relativamente amplios y se mantienen ligados.

M (Mediano)

- Bloques definidos por fisuras de severidad moderada; los planos son más pequeños evidenciándose un moderado despostillamiento de los bordes de las fisuras.

A (Alto)

- Bloques definidos por fisuras de severidad alta; los planos son más pequeños evidenciándose un severo despostillamiento de los bordes de las fisuras, con tendencia a formar bache.

Medición: Es el total de losas afectadas en un tramo o en metros cuadrados, totalizados en una sección de carretera.



Figura 2.13 Fisuras en Bloque Interconexión tramo II.

Fisuras inducidas

Descripción: Es un conjunto de fisuras o grietas cuyo desarrollo en el pavimento es inducido por factores relativos a una inadecuada distribución de juntas o inapropiada inserción de estructuras u otros elementos dentro de la losa.

Posibles causas:

- El arreglo de juntas en un carril no es respetado en el carril contiguo.
- Parchados que no respetan bordes o juntas existentes.
- Falta de elementos de aislamiento entre estructuras de pavimento.

Niveles de severidad:

B (Bajo)

- Fisuras finas, no activas, de ancho promedio menor de 3 mm.

- Fisuras selladas de cualquier ancho, con el material de sello en condición satisfactoria.
- No hay signos visibles de despostillamiento y/o dislocamiento.

M (Mediano)

- Fisuras de ancho promedio entre 3 y 10 mm.
- Fisuras selladas de cualquier ancho, con el material de sello en condición satisfactoria.
- No hay signos visibles de despostillamiento y/o dislocamiento

A (Alto).

- Fisuras de ancho promedio mayor de 10 mm.
- Fisuras selladas o no, con despostillamiento severo y/o dislocamiento mayor de 10 mm.

Medición: Total de losas afectadas en un tramo o en metros lineales, totalizados en una sección de carretera.



Figura 2.14 Fisuras inducidas Boulevard Monseñor Romero

Levantamiento de losas

Descripción: sobre elevación de la superficie del pavimento que se localiza contiguo a las juntas o como fisura transversal.

Posibles causas: poca libertad de expansión de las losas.

Niveles de severidad:

Bajo: poco perceptible por los usuarios a velocidad promedio. Presenta baja incidencia en la comodidad de manejo.

Mediano: genera incomodidad al usuario y obliga a disminuir la velocidad de circulación.

Alto: excesivo salto del vehículo en circulación, causando descontrol del mismo, presenta incomodidad al usuario y consiste en un riesgo para la seguridad provocando daños a los vehículos y reduciendo la velocidad de operación.

Medición: cuando se levanta una junta se considera como 2 losas afectadas o total de losas afectadas en un tramo.



Figura 2.15 Levantamiento de losas en calle Pérez Escobosa, México. (Periódico local mexicano).

Escalonamiento:

Descripción: desnivel que presentan las losas continuas a un lado de una junta

Posibles causas: deficiente transferencia de carga entre juntas transversales, ascenso a través de la junta o grieta del material de la subbase o depresión del extremo de la losa al disminuir la capacidad portante de la fundación.

Niveles de severidad:

Bajo: diferencia de nivel menor 10 mm

Mediano: diferencia de nivel entre 10 y 20 mm

Alto: diferencia de nivel mayor a 20 mm

Medición: total de losas afectadas en un tramo.



Figura 2.16 Escalonamiento de Losas, 50 Av. Norte, San Salvador.

Hundimiento:

Descripción: asentamiento diferencial del pavimento debido al descenso de la superficie de rodadura que puede estar acompañado de fisuramiento significativo.

Posibles causas: asentamiento de la subrasante o deficiencias en el proceso constructivo de las losas

Niveles de severidad:

Bajo: no genera incomodidad al usuario, pero causa balanceo o salto característico del vehículo.

Mediano: causa en los vehículos un significativo salto o balanceo, generando incomodidad.

Alto: excesivo salto que provoca pérdida de control de los vehículos, generando una reducción de velocidad.



Figura 2.17 Hundimiento en pavimento de concreto Interconexión tramo II.

Descascaramiento y fisuras capilares

Descripción: rotura superficial de la losa hasta una profundidad de 15 mm.

Posibles causas: en pavimentos de concreto hidráulico se presenta debido a un exceso de acabado del concreto fresco colocado.

Niveles de severidad:

Bajo: fisuras que se extienden sobre toda la losa. La superficie se encuentra en condición buena.

Mediano: el descascaramiento afecta menos del 10% de la losa.

Alto: el descascaramiento surge en áreas significativas afectando el 10% de la losa

Medición: todo al de losas afectadas en el tramo que depende de la severidad observada.



Figura 2.18 Descascaramiento y Fisuras capilares Boulevard Orden de Malta.



Figura 2.19 Descascaramiento y Fisuras capilares Boulevard Orden de Malta.

Pulimiento de superficie:

Descripción: desgaste de la superficie del agregado que compone la losa, presentando la capa de rodadura excesivamente lisa.

Posibles causas: desgaste ocasionado por el paso de vehículos, cuando el concreto utilizado es de baja calidad, exponiendo los agregados en la superficie.

Niveles de severidad: no se definen. Sin embargo, el grado de pulimiento debe ser significativo.

Medición: metros cuadrados de superficie afectada.



Figura 2.20 Pulimiento de superficie.

Fuente: Manual para la inspección visual de pavimentos rígidos, Universidad Nacional de Colombia.



Figura 2.21 Pulimiento de superficie

Fuente: Manual para la inspección visual de pavimentos rígidos, Universidad Nacional de Colombia).

Peladuras

Descripción: progresiva desintegración de la superficie del pavimento debido a la pérdida de material fino desprendido.

Posibles causas:

- Dosificación de agregado inadecuada
- Efecto abrasivo del tránsito sobre concreto pobre y deficiencia del proceso constructivo.

Nivel de severidad:

Bajo: se exponen pequeñas peladuras superficiales en pequeñas áreas.

Mediano: las peladuras se extienden en toda la superficie provocando de material exclusivamente fino.

Alto: peladura generalizada en toda la superficie extendiéndose sobre la superficie dando lugar a una superficie muy rugosa creando pequeños baches.

Medición: total de losas afectadas.



Figura 2.22 Peladuras.

Fuente: Manual para la inspección visual de pavimentos rígidos, Universidad Nacional de Colombia.

Desintegraciones en los pavimentos de concreto hidráulico

Descripción: progresiva desintegración de la superficie del pavimento debido a la pérdida de material fino desprendido.

Posibles causas:

- Dosificación de agregado inadecuada.
- Efecto abrasivo del tránsito sobre concreto pobre.
- Deficiencia del proceso constructivo.

Nivel de severidad:

(B) Bajo

- Se exponen pequeñas peladuras superficiales en pequeñas áreas.

(M) Mediano

- Las peladuras se extienden en toda la superficie provocando de material exclusivamente fino.

(A) Alto

- Peladura generalizada en toda la superficie extendiéndose sobre la superficie dando lugar a una superficie muy rugosa creando pequeños baches.

Medición: total de losas afectadas.

Deficiencia de juntas en los pavimentos de concreto hidráulico

Descripción: permite la acumulación de material y la infiltración de agua en las juntas impidiendo el movimiento esperado de la losa.

Posibles causas: material de sello deficiente, escasez o ausencia de sello, levantamiento de sello por el paso de los vehículos, endurecimiento del sello.

Niveles de severidad:

Bajo: el material del sello se encuentra en buena condición en general, no existiendo riesgo de infiltración de material incompresible.

Mediano: el material del sello tiene condición regular.

Alto: el material del sello es deficiente o no existe. Las juntas requieren ser selladas a la brevedad.

Medición: depende de la condición del material de sello en toda el área.



Figura 2.23 Deficiencia en el sello de juntas entre losas adyacentes. (Boulevard Orden de Malta).

Despostillamiento.

Descripción: se considera despostillamiento a toda aquella rotura, fractura o desintegración de los bordes de las losas, pudiéndose dar dentro de una junta o de una esquina.

Posibles causas:

- Excesivas tensiones en las juntas, siendo estas ocasionadas por el tránsito o por infiltración de materiales incompresibles.
- Cuando no se tiene un buen control de calidad del concreto, es posible que no tenga la resistencia requerida (debilidad del concreto) generando así despostillamiento.

- En ocasiones se genera acumulación de agua a nivel de las juntas provocando así el fenómeno de bombeo, luego genera la erosión y culmina con la aparición del despostillamiento.
- Cuando existe sistema de transferencia de carga, es necesario realizar un buen diseño de él, ya que al no hacerlo termina afectando la losa.

Niveles de severidad:

(B) Bajo

- Cuando solo existen pequeños fracturamiento, que no se extienden más de 8 cm a cada lado de la junta.

(M) Mediano

- Cuando las fracturas se extienden a lo largo de la junta en más de 8 cm a cada lado de la misma, generando trozos sueltos que pueden ser removidos, la profundidad de los trozos debe ser menos de 25mm.

(A) Alto

- Cuando las fracturas se extienden a lo largo de la junta en más de 8 cm a cada lado de la misma, las piezas o trozos generados han sido removidos por el tránsito y debe tener una profundidad mayor a 25mm.

Medición: La medición de este tipo de daño se cuantifica en términos de losas afectadas.



Figura 2.24 Despostillamiento. (Boulevard Monseñor Romero tramo I).

Fisuras por mal mantenimiento de juntas.

Descripción: Son fisuras sinuosas que aparecen aproximadamente paralelas y localizadas muy próximas a una junta longitudinal.

Posibles causas:

- Falta de verticalidad de la junta o realización errónea de corte de la junta.
- Realización de cortes poco profundos.

- Reincidencia del trazo durante la ejecución de la junta.

Niveles de severidad:

(B) Bajo

- Cuando hay aparición de fisuras finas de ancho menos de 3mm o cuando existen fisuras selladas, pero sin ningún tipo de despostillamiento o dislocamiento.

(M) Mediano

- Cuando existen juntas de ancho promedio entre 3 y 10mm, cuando aparece despostillamiento hasta 10mm, cuando el sello de fisuras está en condición insatisfactoria.

(A) Alto

- Cuando las fisuras tienen un ancho promedio mayor de 10mm, existencia de despostillamiento mayor a 10mm y cuando el área entre fisuras y la junta se ha fracturado en trozos pequeños que se encuentran sueltos y removidos por el tránsito.

Medición: La medición de este tipo de daño se cuantifica en términos de juntas afectadas.

Bombeo.

Descripción: Se produce cuando la expulsión de agua mezclada con suelos finos, a través de las juntas, grietas o bordes externos del pavimento, al pasar un vehículo especialmente pesado genera el ingreso de agua por falta de material adecuado en el sellante de la junta.

Posibles causas:

- Existencia de agua entre la subbase y la losa de concreto.
- Subbase completamente saturada de agua.
- Proceso de transmisión de carga entre losas inadecuado.

Niveles de severidad:

(B) Bajo

- Se aprecia un incipiente bombeo hacia la superficie, entre las juntas.

(M) Mediano

- Existencia de bombeo pronunciado hacia la superficie, sin rompimiento de losas.

(A) Alto

- Cuando el bombeo es pronunciado hacia la superficie, con rompimiento de losas.

Medición: La medición de este tipo de daño se cuantifica en términos de juntas afectadas con este daño.

Acabados inadecuados.

Descripción: Cuando es posible observar la carencia o pérdida de la textura superficial necesaria para que exista una fricción adecuada entre el pavimento y los neumáticos de los vehículos que circulan por la misma.

Posibles causas:

- No se le aplicó un texturizado adecuado a la losa de concreto.
- Concreto mal dosificado o mala calidad de arena.
- Exceso de mortero en la superficie de la losa de concreto.

Niveles de severidad:

- No es posible establecerse a partir de una inspección visual, por lo que se debe calcular en función de las áreas que causan una reducción, resistencia o incomodidad al desplazamiento de vehículos.

Medición: La medición de este tipo de daño se cuantifica en términos de metros cuadrados identificados.

2.13 CONDICIONES DE SERVICIO DE LOS PAVIMENTOS RIGIDOS

Las condiciones de servicio dependen del enfoque utilizado en el diseño de la estructura del pavimento. En El Salvador el método de diseño AASHTO 93 es el más utilizado para la realización de los diseños de pavimentos, los cuales toman en cuenta parámetros específicos como la importancia de la serviciabilidad para el diseño de las estructuras de pavimentos. Factores como el tránsito promedio diario anual y especificaciones de los suelos, juegan un papel importante a la hora del diseño y se proyectan a lo largo del periodo de diseño del proyecto.

Una de las condiciones más relevantes incluidas en la guía de diseño AASHTO 93 es la serviciabilidad, que es la condición del pavimento que proporciona seguridad y comodidad a los usuarios, la cual está estrechamente relacionada con el comportamiento funcional de los pavimentos. Los índices de serviciabilidad inicial establecen la condición inicial del pavimento inmediatamente después de su construcción. El valor inicial deseable para los pavimentos rígidos es de 4.5. Además, el índice de serviciabilidad final se refiere a la condición en que la capa de rodadura ya no cumple con la comodidad y seguridad exigida por el usuario. Es por ello que la guía de diseño AASHTO 93 propone la siguiente tabla como índices de serviciabilidad final para las distintas clasificaciones de las vías.

Serviciabilidad Terminal (Pt)	Porcentaje de usuarios que consideran inaceptable la condición del pavimento
3.0	12
2.5	55
2.0	85

Tabla 2.4 Valores de serviciabilidad

Fuente: Guía de diseño AASHTO 93

Perdida de Serviciabilidad según la Guía de diseño AASHTO 93.

La guía AASHTO 93 implementa, de la misma manera, la pérdida de serviciabilidad, que se da por la influencia de factores externos que afectan la estructura del pavimento; estos pueden ser factores climáticos, edad del pavimento, medio ambiente y tránsito. Dicha condición se define como “la diferencia entre el índice de servicio inicial (P_0) y terminal” (P_t)

$$\Delta PSI = P_0 - P_t$$

Por otra parte, el método AASHTO 93 toma en cuenta optimizar el espesor del pavimento para un buen servicio y durabilidad. Un espesor mayor asegurará un buen desempeño y costos de mantenimiento bajo, sin embargo, los costos de inversión serán altos. Esta condición generalmente se limita por la capacidad económica de los propietarios del proyecto.

CAPÍTULO

III

CAPÍTULO III: MÉTODO DE DISEÑO AASHTO 93

3.1 GENERALIDADES DEL MÉTODO DE DISEÑO AASHTO 93

La guía de diseño AASHTO fue desarrollada en Estados Unidos en 1960 y con su mejora en 1993 introduce el concepto de serviciabilidad en el diseño de los pavimentos para mejorar la percepción del usuario sobre la superficie de rodadura.

Los factores de diseño que involucra el método AASHTO 93 dependen de las condiciones técnicas y específicas para cada proyecto. El objetivo de determinar la exactitud de las variables de diseño, es predecir el comportamiento de la estructura de pavimento evitando así el daño y el progresivo colapso durante la vida en servicio del proyecto.

Es por ello que el método expone la siguiente ecuación fundamental que contiene las siguientes variables para el diseño de la estructura de pavimento rígido:

$$\text{Log } W_{18} = Z_R S_0 + 7.35 \log(D+1) - 0.06 + \frac{\log\left(\frac{\Delta\text{PSI}}{4.5-1.5}\right)}{\frac{1.624 \times 10^7}{(D+1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32P_t) \log \left[\frac{S'_c C_d (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 J \left[D^{0.75} - \frac{18.42}{\left[\frac{E_c}{k}\right]^{0.25}} \right]} \right]$$

Donde:

W_{18} = Número de cargas de 18 kips (80 kN).

Z_R = Es el valor de Z (área bajo la curva de distribución) correspondiente a la curva estandarizada, para una confiabilidad R.

S_0 = Desviación estándar de todas las variables.

D = Espesor de la losa del pavimento en pulgadas.

ΔPSI = Pérdida de serviciabilidad prevista en el diseño.

P_t = Serviciabilidad final.

S'_c = Módulo de rotura del concreto en psi.

J = Coeficiente de transferencia de carga.

C_d = Coeficiente de drenaje.

E_c = Módulo de elasticidad del concreto, en psi.

k = Módulo de reacción de la subrasante (coeficiente de balastro), en pci (psi/pulg)

A continuación, se describen dichas variables:

Periodo de diseño.

El período de diseño es el tiempo transcurrido, en el cual una estructura nueva o rehabilitada se deteriora desde su serviciabilidad inicial hasta serviciabilidad final.

El periodo de diseño depende de la importancia de la carretera, tal como se presenta en la siguiente tabla.

Highway Conditions	Analysis Period (years)
High-volume urban	30-50
High-volume rural	20-50
Low-volume paved	15-25
Low-volume aggregate surface	10-20

Tabla 3.1 Periodo de diseño de las estructuras de pavimento.

Fuente: Guía de diseño AASHTO 93

Tránsito.

El tránsito está compuesto por vehículos de diferente peso y número de ejes que producen diferentes tensiones y deformaciones en el pavimento, lo cual origina distintas fallas en éste. Para tener en cuenta esta diferencia, el tránsito obtenido de los conteos vehiculares se transforma a un número de cargas por eje simple equivalente de 18 kips (80 kN) ó ESAL (Equivalent Single Axle Load), de tal manera que el efecto dañino de cualquier eje pueda ser representado por un número de cargas por eje simple a través de la siguiente ecuación:

$$w_{18} = D_D \times D_L \times W'_{18}$$

Donde:

W_{18} = Tránsito futuro estimado

D_D = Es un factor de distribución direccional, que expresa como una proporción la distribución de los ESAL'S por sentido.

D_L = Es un factor de distribución de carril, expresado como una proporción, que explica la distribución del tráfico cuando dos o más carriles, están disponibles en una dirección.

W'_{18} = Las unidades de ESAL de 18 kips previstas para la sección específica que se está diseñando durante el período de análisis.

También pueden determinarse el número de ejes equivalentes mediante el uso de los gráficos propuestos en el método AASHTO 93 o tablas de cargas por ejes desarrollados por instituciones nacionales, transformando las cargas con la utilización de factores de distribución para obtener los ejes equivalentes de 18 kips por cada tipo de vehículo.

A continuación, se presenta la tabla de cargas por eje para cada tipo de vehículo, extraídas del Acuerdo Regional sobre Límites Máximos de Pesos y Dimensiones para Vehículos de Carga Internacional en Carreteras de Centroamérica.

Vehículo	Tipo de Eje	Carga por eje	
		Ton	Kips
Livianos de pasajeros	Simple (Delantero)	1.0	2.2
	Simple (Trasero)	1.0	2.2
Microbuses	Simple (Delantero)	1.0	2.2
	Simple (Trasero)	2.5	5.5
Pesados de Pasajeros	Simple (Delantero)	5.0	11.0
	Simple Dual(Trasero)	9.0	19.8
C-2	Simple (Delantero)	5.0	11.0
	Simple Dual (Trasero)	10.0	22.0
C-3	Simple (Delantero)	5.0	11.0
	Tándem (Trasero)	16.5	36.3
T3-S2	Simple (Delantero)	5.0	11.0
	Tándem (Delantero)	16.0	35.2
	Tándem (Trasero)	16.0	35.2
T3-S2	Simple (Delantero)	5.0	11.0
	Tándem (Delantero)	16.0	35.2
	Tándem (Trasero)	20.0	44.0

Tabla 3.2 límites de carga por eje

Fuente: Acuerdo regional sobre límites máximos de pesos y dimensiones para vehículos de carga internacional en carreteras de Centroamérica.

Confiabilidad.

La confiabilidad es la probabilidad de que el pavimento se comporte satisfactoriamente durante su vida útil o período de diseño, resistiendo las condiciones de tránsito y medio ambiente dentro de dicho período. Es de suma importancia resaltar, que cuando hablamos del comportamiento del pavimento nos referimos a su capacidad estructural y funcional, es decir, a la capacidad de soportar las cargas impuestas por el tránsito, además, de brindar seguridad y confort al usuario durante el período para el cual fue diseñado. La confiabilidad que la guía de diseño AASHTO 93 recomienda es del 80% al 99% dependiendo del grado de importancia de la carretera según su clasificación.

Functional Classification	Recommended Level of Reliability	
	Urban	Rural
Interstate and Other Freeways	85-99	80-99
Principal Arterials	80-99	75-95
Collectors	80-95	75-95
Local	50-80	50-80

Tabla 3.3 Clasificación funcional de la carretera. AASHTO 93.

Fuente: Guía de diseño AASHTO 93

Serviciabilidad.

La filosofía de diseño básica de la guía AASHTO es el concepto de Serviabilidad la cual permite diseñar un pavimento para un volumen total de tránsito específico

y un mínimo nivel de Serviciabilidad deseado al final del periodo de diseño. Los índices inicial y final deberán estar acordes con la función de la estructura de pavimento diseñado y la calidad de construcción.

El concepto también se relaciona con las características físicas que puede presentar el pavimento como grietas, fallas, peladuras, etc, que podrían afectar la capacidad de soporte de la estructura (comportamiento estructural).

El concepto de serviciabilidad está basado en cinco aspectos fundamentales:

1. Las carreteras están construidas para generar confort y conveniencia del público usuario.
2. El confort, o calidad de la transitabilidad, es materia de una respuesta subjetiva de la opinión del usuario.
3. La serviciabilidad puede ser expresada por medio de la calificación hecha por los usuarios de la carretera y se denomina la calificación de la serviciabilidad.
4. Existen características físicas de un pavimento que pueden ser medidas objetivamente y que pueden relacionarse a las evaluaciones subjetivas. Este procedimiento produce un índice de serviciabilidad objetivo.
5. El comportamiento puede representarse por la historia de la serviciabilidad del pavimento.

La valoración de este parámetro define el concepto de Índice de Serviciabilidad Presente (PSI). El PSI califica a la superficie del pavimento de acuerdo a una

escala de valores de 0 a 5. El diseño estructural basado en la serviciabilidad, considera necesario determinar el índice de serviciabilidad inicial (P0) y el índice de serviciabilidad final (Pt).

- Índice de serviciabilidad inicial (P0)

El índice de serviciabilidad inicial (P0) se establece como la condición original del pavimento inmediatamente después de su construcción o rehabilitación, obtenida de acuerdo a las condiciones técnicas del proyecto.

- Índice de serviciabilidad final (Pt)

El índice de serviciabilidad final (Pt), ocurre cuando la superficie del pavimento ya no cumple con las expectativas de comodidad y seguridad exigidas por el usuario.

Terminal Serviceability Level	Percent of People Stating Unacceptable
3.0	12
2.5	55
2.0	85

Tabla 3.4 Índice de serviciabilidad final, AASHTO 1993.

Fuente: Guía de diseño AASHTO 93

Módulo efectivo de reacción de la subrasante (k).

El módulo de reacción de la subrasante se define como el valor de la capacidad de soporte de la subrasante a través del asentamiento cuando se le aplica un esfuerzo de compresión. Sus valores son expresados en pci (libra por pulgada cuadrada por pulgada). Sólo los componentes elásticos de la deformación son considerados representativos para las cargas del tránsito sobre el pavimento.

Este factor nos da idea de cuánto se asienta la subrasante cuando se le aplica un esfuerzo de compresión. Numéricamente, es igual a la carga en libras por pulgada cuadrada sobre un área de carga, dividido por la deflexión en pulgadas para esa carga. Puesto que la prueba de carga sobre placa, requiere tiempo y es costosa, el valor de k es estimado generalmente por correlación con otros ensayos simples, tal como la razón de soporte california (CBR). Para obtener el módulo de reacción de la subrasante existen dos métodos: el primero mediante la correlación con respecto a la calidad del suelo y el segundo mediante el uso del nomograma propuesto por el método AASHTO 93, teniendo como variables de entrada el Módulo de resiliencia de la subrasante, el espesor de la subbase y el coeficiente de elasticidad.

A partir del nomograma que se muestra a continuación es estimado el valor de k.

Figura 7-29
 Nomograma para determinar el módulo de reacción compuesto de la subrasante, suponiendo una profundidad infinita

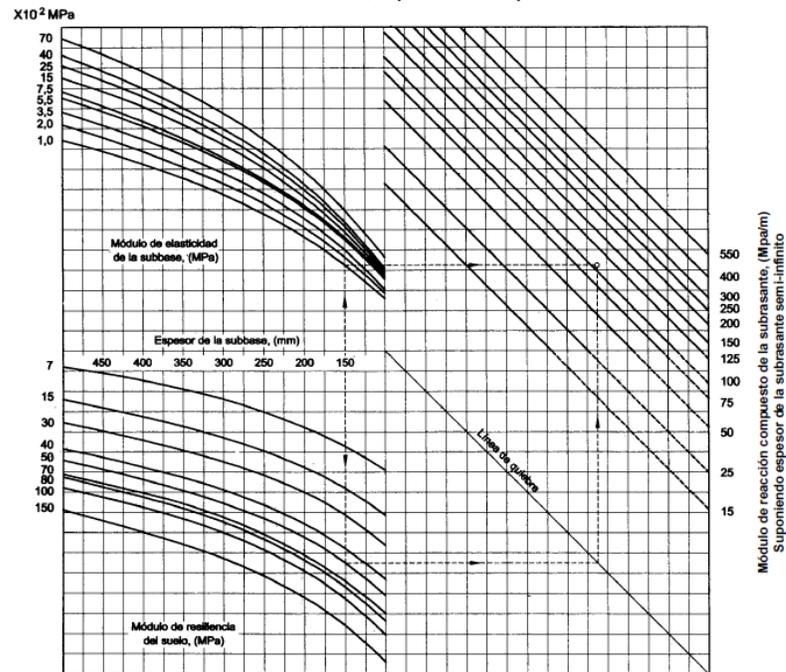


Figura 3.1 Nomograma para determinación de valor de k.

Módulo de elasticidad del concreto.

Indica la capacidad de distribución de las cargas que posee una losa de concreto hidráulico y consiste en la relación tensión – deformación. American Concret Institute (ACI) estableció la siguiente correlación del módulo de elasticidad para el cemento portland de peso normal.

$$E_c = 57000(f'c)^{0.5}$$

Donde

$$E_c = \text{Modulo elastico en psi}$$

$$f'c = \text{Esfuerzo de compresión en psi}$$

Módulo de ruptura del concreto.

Se le conoce también como la resistencia a la flexión del concreto y se obtiene por el procedimiento del ensayo de carga después de 28 días usando el ensayo de carga en los tercios definido en AAHSTO T 97, ASTM C 78. Otra forma de estimar este módulo es mediante otra prueba similar la ASTM C293 aplicándole carga al centro del claro; los resultados obtenidos son diferentes en este procedimiento variando aproximadamente entre 15% a 20%.

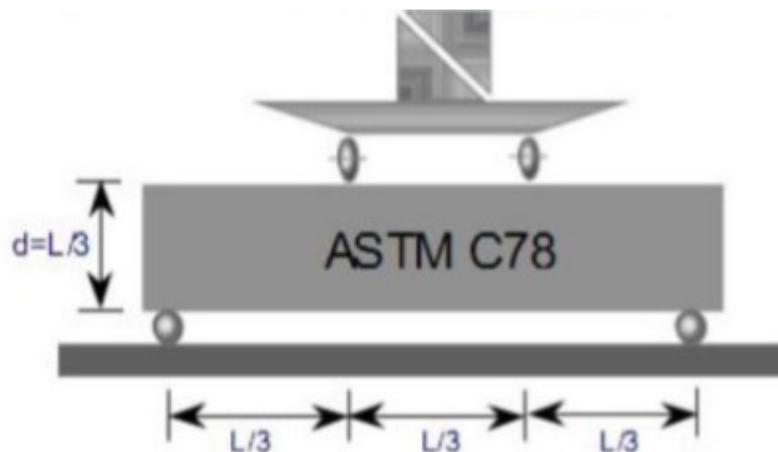


Figura 3.2 Esquema prueba de carga. ARROYO, Nancy. Diseño y conservación de pavimentos rígidos

En el caso del método de ensayo ASTM C78 para el cálculo del módulo de ruptura se presentan las siguientes ecuaciones:

- Si el espécimen falla en su tercio medio, el Módulo de Ruptura se determinará de la siguiente forma:

$$\text{Modulo de Ruptura} = \frac{pl}{bd^2}$$

Donde:

P: Carga máxima aplicada. Carga de falla, kg.

l: Longitud del claro, cm.

b: Ancho del espécimen en el área de fractura, cm.

d: Profundidad o altura de espécimen en el área de fractura, cm

- Si la sección de falla ocurre fuera del tercio central (pero sin exceder más del 5%) se recomienda calcular el Módulo de Ruptura por la expresión:

$$\text{Modulo de Ruptura} = \frac{3pa}{bd^2}$$

Donde:

a: distancia medida entre la línea de fractura y el apoyo más próximo, medida sobre la superficie a tensión de la viga (cm.).

b: Ancho del espécimen en el área de fractura, cm.

d: Profundidad o altura de espécimen en el área de fractura, cm

- Si la sección de falla queda fuera del tercio central y a una distancia que exceda el 5% del claro, el resultado del ensaye debe desecharse.

En el caso del método de ensayo ASTM C293 toda la carga se aplica en el centro del claro. El módulo de ruptura será mayor que en caso de la carga en los puntos tercios y la tensión máxima se dará en el centro de la viga.

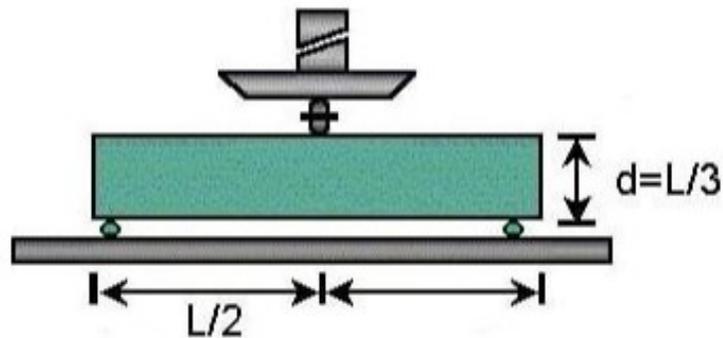


Figura 3.3 Aplicación de carga al centro del claro. ARROYO, Nancy. Diseño y conservación de pavimentos rígidos

Para el cálculo del módulo de ruptura se aplica la siguiente formula:

$$\text{Modulo de Ruptura} = \frac{3pl}{2bd^2}$$

Dónde:

P = máxima carga aplicada, indicada por la máquina de ensayo (kg).

L = longitud entre apoyos (cm).

b = ancho promedio del espécimen, a la fractura (cm).

d = altura promedio del espécimen, a la fractura (cm).

Variables dependientes de las condiciones ambientales a las que estará sometido el pavimento

Coeficiente de Drenaje C_d .

La calidad del drenaje influye directamente en el comportamiento de los pavimentos, es por ello que el método AASHTO 93 delimita los coeficientes para su diseño dependiendo de las condiciones a las que estará sometida la estructura. La AASHTO establece el valor de 1.0 para un buen sistema de drenaje.

Table 2.5. Recommended Values of drainage coefficient, C_d, for Rigid Pavement design.				
Percent of Time Pavement Structure is Exposed to Moisture Levels Approaching saturation.				
Quality of Drainage	Less Than 1%	1% - 5%	5% - 25%	Greater Than 25%
Excellent	1.25-1.20	1.20-1.15	1.15-1.10	1.10
Good	1.20-1.15	1.15-1.10	1.10-1.00	1.00
Fair	1.15-1.10	1.10-1.00	1.00-0.90	0.90
Poor	1.10-1.00	1.00-0.90	0.90-0.80	0.80
Very poor	1.00-0.90	0.90-0.80	0.80-0.70	0.70

Tabla 3. 5 Valores de coeficiente de drenaje.

Fuente: Guía de diseño AASHTO 93

Para seleccionar el coeficiente de la tabla anterior, es necesario seguir las siguientes indicaciones:

a.1) Se calcula el tiempo de drenaje de cada una de las capas no ligada para pavimentos flexibles o de la subbase combinada con la subrasante para el caso de pavimentos rígidos.

a.2) Se selecciona una calidad de drenaje en función del tiempo de drenaje calculado.

a.3) Calcular el tiempo en que la estructura de pavimento va a estar expuesta a niveles de humedad próximos a saturarse.

a.4) Con la calidad de drenaje y el porcentaje de tiempo en que el pavimento va a estar expuesto a niveles de humedad cercanos a la saturación, se selecciona el coeficiente de drenaje m_x ó C_d según sea el tipo de pavimento que se esté calculando.

Coeficiente de transferencia J.

Es la capacidad que tiene la estructura de pavimento rígido de transferir y distribuir las cargas a través de discontinuidades como las juntas o las grietas. El confinamiento lateral (hombros) y las juntas aserradas juegan un papel importante en el efecto de este coeficiente. Una eficiente transferencia de cargas minimizara las deflexiones en las juntas.

Table 2.6. Recommended Load Transfer Coefficient for Various Pavement Types and Design Conditions.				
Shoulder	Asphalt		Tied P.C.C	
Load Transfer Devices	Yes	No	Yes	No
Pavement Type				
1 Plain jointed and jointed reinforced	3.2	3.8-4.4	2.5-3.1	3.6-4.2
2 CRCP	2.9-3.2	N/A	2.3-2.9	N/A

Tabla 3.6 Transferencia de carga

Fuente: Guía de diseño AASHTO 93

Es recomendable utilizar el valor más alto cuando menor sea el Módulo de reacción de la subrasante k , también cuando sea más elevado el coeficiente de dilatación térmica del concreto y mayores las variaciones de temperatura ambiente.

Pérdida de soporte L_s .

Se refiere a la pérdida de soporte de las losas de pavimento rígido provocado por la erosión de la subbase y los asentamientos diferenciales de la subrasante. A pesar de usar una subbase estabilizada y no erosionable, el pavimento puede presentar vacíos que repercuten en la estructura, reduciendo su vida útil.

Table 2.7. Typical Ranges of Loss of Support (LS) Factors for Various Types of Materials (6).	
Type of Material	Loss of Support (LS)
Cement Treated Granular Base (E=1,000,000 to 2,000,000 psi)	0 0 to 1 0
Cement Aggregate Mixtures (E=500,000 to 1,000,000 psi)	0 0 to 1 0
Asphalt Treated Base (E=350,000 to 1,000,000 psi)	0 0 to 1 0
Bituminous Stabilized Mixtures (E=40,000 to 300,000 psi)	0 0 to 1 0
Line Stabilized (E=20,000 to 70,000 psi)	0 0 to 3 0
Unbound Granular Materials (E=15,000 to 45,000 psi)	1 0 to 3 0
Fine Grained or Natural Subgrade Materials (E=3,000 to 40,000 psi)	2 0 to 3 0
Note: E in this table refers to the general symbol for elastic or resilient modulus of the material.	

Tabla 3.7 Pérdida de soporte

Fuente: Guía de diseño AASHTO 93

Este factor no aparece en forma directa en la fórmula de diseño para obtener el espesor de un pavimento de concreto; pero si está en forma indirecta a través de la reducción del Módulo de reacción efectivo de la superficie (subrasante) en que se apoyan las losas.

Por otro lado cabe mencionar que en el Supplement to the AASHTO Guide for Design of Pavement Structures Part II, publicado en el año 1998 se hace la aclaración que la metodología de diseño de AASHTO requiere el valor promedio de k , no el valor más bajo medido o algún otro valor conservador. Se debe tener en cuenta también que no se aplica ningún ajuste adicional al valor k por la pérdida de soporte.

La pérdida sustancial de soporte existió para muchas secciones en la AASHTO Road Test, lo que causa un incremento en el agrietamiento de la losa y la pérdida de capacidad de servicio. Por lo tanto, los datos de rendimiento sobre los cuales se basa el modelo de la AASHTO Road Test reflejan el efecto de una pérdida considerable de soporte.

Luego de la determinación de las variables antes mencionadas, se dispone a ingresarlos en la fórmula fundamental y realizar las iteraciones necesarias para determinar el espesor del pavimento que cumpla con las condiciones planteadas del proyecto.

3.2 SOFTWARE DE DISEÑOS DE PAVIMENTOS RÍGIDOS BASADOS EN EL MÉTODO AASHTO 93.

Los informes de diseños de pavimentos que han sido obtenidos están realizados bajo el método de diseño AASHTO 93 de pavimentos de concreto hidráulico. Dichos diseños se auxilian de software para poder facilitar y corroborar los diseños propuestos. Es así que se facilita el proceso, de tal manera que no es necesario realizar iteraciones como anteriormente se realizaba, es por ello que el tiempo invertido es considerablemente reducido, además, se corroboran de manera eficiente los resultados obtenidos de manera manual contra los obtenidos a través del software, generando así resultados verídicos.

Dentro de los diseños obtenidos se encuentra la utilización de dos software, siendo el software DARWin y el software WinPAS. A continuación, se describen dichos software:

Descripción del software DARWin

Diseño, Análisis y Rehabilitación para Windows (DARWin), es una herramienta computarizada de diseño de pavimentos basada en la Guía AASHTO para el Diseño de Estructuras de Pavimentos. Sin embargo, DARWin es mucho más que una presentación en línea del diseño Metodología en la Guía de Diseño AASHTO. Además de proporcionar un medio preciso y completo para realizar diseños de pavimentos, DARWin realiza una amplia gama de análisis y cálculos que no están

disponibles en otros programas de diseño de pavimentos. DARWin también es rápido, fácil de usar y puede agilizar muchas tareas repetitivas. Con sus muchas características personalizables, DARWin simplifica el proceso de diseño del pavimento que se traduce en diseños mejorados. Debido a que funciona en el entorno de Windows, se pueden realizar o ver varios diseños al mismo tiempo y compararlos. También se puede utilizar otro software, como hojas de cálculo y procesadores de texto, mientras trabajas con DARWin. De hecho, casi cualquier software compatible con Windows puede usarse junto con DARWin.

DARWin está compuesto de módulos, los cuales se clasifican en: Módulo de diseño estructural de pavimento flexible, Módulo de diseño estructural de pavimento rígido y Módulo de diseño de superposición. Se retoma de estos tres módulos el de diseño estructural de pavimento rígido, debido a que la investigación lleva este enfoque.

El módulo de diseño estructural de pavimento rígido se utiliza para diseñar y analizar los pavimentos de concreto de cemento Portland (PCC). El grosor requerido de la losa (D) se calcula directamente en función de las entradas de diseño dadas. Las gráficas de sensibilidad y otras características que se encuentran en el módulo de pavimento flexible también están disponibles aquí. Otras características del pavimento rígido, como el refuerzo de acero, las barras de unión y los depósitos de unión pueden diseñarse utilizando este módulo.

A continuación, se presenta una captura de imagen del software DARWin, en la cual se logra observar el módulo de diseño estructural de pavimento rígido:

The screenshot shows a window titled "City Streets - First Street" with a description field containing "Rigid Pavement Design for First street". Below this, various input parameters and their calculated values are listed:

18-kip ESALs Over Initial Performance Period	3,028,932	
Initial Serviceability	4.2	
Terminal Serviceability	2.5	
28-day Mean PCC Modulus of Rupture	850	psi
28-day Mean Elastic Modulus of Slab	3,500,000	psi
Mean Effective k-value	145.92885	psi/in
Reliability Level (%)	95	
Overall Standard Deviation	0.38	
Load Transfer Coefficient, J	2.8	
Overall Drainage Coefficient, Cd	1	
Calculated Design Thickness	7.09	in

Figura 3.4 Módulo de diseño estructural de pavimento rígido.

También se observan las variables de ingreso que el programa exige, dichas variables son: 18 Kips ESALs durante el período de rendimiento inicial, serviciabilidad inicial, módulo de ruptura, módulo de elasticidad, módulo de reacción, nivel de confiabilidad, desviación estándar, coeficiente de transferencia de carga y coeficiente de drenaje.

Al ingresar las variables antes mencionadas se obtendría un valor calculado por el software del tamaño de espesor de diseño.

Descripción del software WinPAS

WinPAS es un programa de ordenador, realizado por “American Concrete Pavement Association (ACPA)”, con la facilidad de poder ser instalado en cualquier tipo de Windows, incluido Windows 7. Tiene incorporados menús para diseñar y analizar sistemas de pavimento mediante la implementación del AASHTO 1993 Guía para el diseño de estructuras de pavimentos. WinPAS tiene la peculiaridad de ser un programa independiente y consta de los siguientes módulos:

1. La identificación de proyectos,
2. Análisis de tránsito,
3. Diseño y evaluación de pavimentos
4. Diseño y evaluación de superposición
5. Análisis de coste de ciclo de vida
6. La presentación de informes.

Además de contar con los módulos antes mencionados, también cuenta con tres menús los cuales son:

- De unidades, en el cual se puede escoger trabajar con el Sistema Internacional o Sistema Inglés.
- De ayuda, en el cual se proporciona un enlace para poder acceder a un manual de utilización del software.
- Menú principal: aquí es donde se despliegan todas las opciones de módulos antes mencionados.

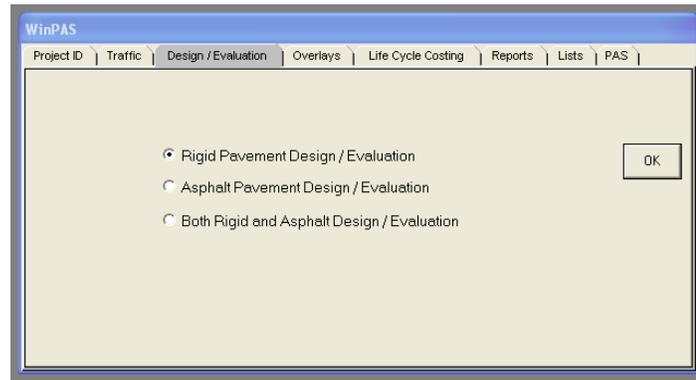


Figura 3.5 Menú principal del software WinPAS

Inicialmente la ficha Proyecto permite introducir información general para un proyecto en general. El programa WinPAS muestra la información ingresada en esta pantalla en la parte superior de todos los informes impresos. Luego aparece la ficha de estimación de ESALs, en la cual, Convierte el tráfico mixto en ESALs según el método AASHTO. Posteriormente se procede a ingresar a la ficha de diseño y análisis, en dicha ficha se debe seleccionar el tipo de análisis que se desea realizar: Pavimento rígido, Pavimento flexible o pavimento flexible con hombros de concreto armado. Luego de haber seleccionado el tipo de diseño y análisis en este caso “diseño de los pavimentos rígidos/Análisis”, en WinPASS Esta pantalla muestra y resuelve las entradas en el pavimento de concreto AASHTO ecuación de rendimiento. La información que se debe incluir es: espesor de losa de concreto (D), el total de ESALs rígido, fiabilidad (R), en general la desviación estándar (s_0), 28 días de media resistencia de flexión (fc'), 28 días de media de módulo de elasticidad (ec), el coeficiente de transferencia

de carga (J), promedio de módulo de reacción de la subrasante (valor k), coeficiente de drenaje (Cd), y condición inicial de servicio y final (PO Y Pt).

Luego de haber ingresado todos los datos antes mencionados se procede a la ficha informes, esta ficha de informes le permite imprimir o guardar los resultados de los análisis realizados con WinPAS. Informes personalizados en nuevos diseños de pavimento, superponer diseños, cálculos ESAL rígidos y flexibles, o análisis de coste de ciclo de vida puede ser impreso.

CAPÍTULO

IV

4.0 MODELOS DE EROSIÓN Y FATIGA

4.1 EROSIÓN EN PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO

El fenómeno de erosión en pavimentos de concreto hidráulico, se refiere a la erosión en la subbase del pavimento de concreto hidráulico. De ahí proviene que la subbase tiene dos funciones fundamentales en la estructura del pavimento, 1) proveer un soporte continuo y homogéneo para las losas de concreto hidráulico, y 2) evitar la erosión y el desgaste de dicho soporte por la acción del agua o de otros agentes adversos. Generalmente, para garantizar la primera condición es necesario, aunque no suficiente, garantizar el cumplimiento de la segunda. De acuerdo con lo anterior, si el material seleccionado para conformar la capa de subbase cumple con las condiciones de resistencia mecánica requeridas en un proyecto particular, pero es fácilmente erosionable ante la presencia de agua, la subbase de soporte podría perder su condición homogénea. La falta de homogeneidad en la capa de soporte promoverá la iniciación y propagación de procesos de agrietamiento y fractura durante la etapa temprana de la vida de la estructura. Estos procesos producirán una pérdida acelerada de las características de funcionalidad y nivel de servicio del pavimento, los cuales a su vez generarán sobrecostos asociados con el funcionamiento general de la red de infraestructura debido a la necesidad de ejecutar obras de rehabilitación no programadas. En este sentido, si bien las losas de concreto pueden trabajar apropiadamente en combinación con bases de variada resistencia estructural, la

pérdida de la homogeneidad de su capa de soporte es una condición que debe ser controlada de forma rigurosa con el fin de garantizar un desempeño satisfactorio de la estructura durante su vida de servicio. Por esta razón, la caracterización de la susceptibilidad a la erosión de los materiales empleados en estas capas es una prioridad para garantizar estructuras eficientes y económicas, desde el punto de vista del análisis de costo de ciclo de vida del proyecto. Los mecanismos físicos asociados a la erosión de pavimentos rígidos tienen su origen en los esfuerzos cortantes inducidos por el movimiento de agua a altas velocidades en la interface entre las placas de concreto y la parte superior de la capa de base (Sánchez-López 1988). En este sentido, es importante resaltar que un requisito indispensable para el desarrollo de daño por erosión es la existencia de agua en estado líquido en la zona de interface. Los esfuerzos de cortante que se desarrollan en la interface entre las dos capas son generados por el movimiento relativo entre placas ante el paso vehicular en la superficie y por las presiones inducidas por el agua líquida que se encuentra presente en la zona. La magnitud de estos esfuerzos depende de la deflexión relativa que se genera entre el centro y las juntas transversales de la losa, así como de la velocidad de movimiento del agua, dos índices que se encuentran fuertemente correlacionados. La deflexión relativa de la losa de concreto ante el paso vehicular depende de las características propias de la estructura del pavimento; en particular, de la capacidad de transferencia de carga entre sus juntas, de la

magnitud de la carga, de la resistencia estructural del pavimento (principalmente del espesor de la losa de concreto) y de la velocidad del paso de dicha carga.

Dependiendo de su magnitud y de las características del material de la capa de subbase, los esfuerzos cortantes pueden promover el desprendimiento de material fino de las capas de base. Cuando esto ocurre, los fragmentos de material desprendido o socavado son arrastrados por el agua a través de la interface y expulsados o bombeados fuera del pavimento en el momento en el que la placa recupera su posición original después del paso de la carga vehicular.

Eventualmente, la pérdida de material fino por bombeo genera zonas de pérdida significativa de material, particularmente cerca de los bordes y esquinas de las placas. El efecto inmediato de este proceso es la disminución de la calidad del soporte de las losas de concreto hidráulico por parte de las capas de subbase.

En las figuras se muestra el proceso de bombeo actuando sobre la estructura del pavimento:

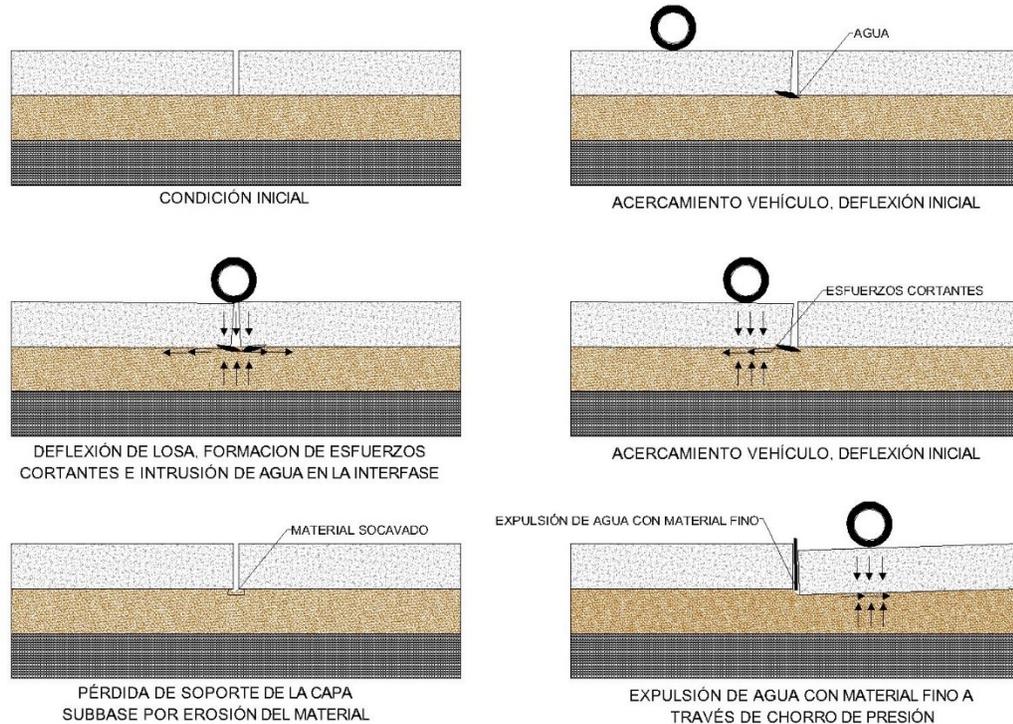


Figura 4.1 Condiciones de la estructura del pavimento provocado por la acción del bombeo.

Luego de haber mostrado el fenómeno de erosión a partir del bombeo en la subbase es importante mencionar que si bien el mecanismo de erosión más común consiste en el desprendimiento de partículas finas de las capas de subbase, existe evidencia experimental (en campo y en laboratorio) que sugiere que existen dos fuentes adicionales de generación de esfuerzos cortantes en la zona de interfase, las cuales contribuyen sustancialmente a la pérdida de material fino y a la pérdida acelerada de la resistencia estructural del pavimento por

erosión: 1) los esfuerzos de fricción generados entre la base de las losas de concreto y el material de subbase , y 2) el efecto de las deflexiones inducidas en las losas de concreto por efecto de expansión térmica. En general, la velocidad a la que evolucionan los procesos de fractura en las placas de concreto cuando existe pérdida de material en su subbase de soporte es muy alta y esta velocidad tiende a aumentar rápidamente en el tiempo. Lo anterior se debe, en parte, a la existencia de nuevas grietas o fisuras en la placa de concreto que generan nuevas rutas de acceso de agua y, por ende, nuevas zonas de alta susceptibilidad a la erosión.

4.1.2 DAÑOS CAUSADOS POR EROSION

Debido a lo que se observa en las carreteras de pavimentos rígidos de El Salvador, es posible clasificar los daños causados por erosión de la siguiente manera:

Deficiencia de material de sello: Es uno de los daños más fundamentales que si bien es cierto no es producto de la erosión, sino que da inicio al proceso para que se genere la erosión al debido a la deficiencia de material de sello y que abre la posibilidad a que se generen otros daños.

Cuando se habla de deficiencia de material de sello, se hace referencia a cualquier condición que posibilita la acumulación de material en las juntas o que dicha junta permite de una manera significativa la infiltración de agua. La acumulación de material incompresible genera inmovilidad en la losa, haciendo

posible la producción de fallas tales como, escalonamiento o despostillamientos de juntas. Este patrón de falla es proveniente del endurecimiento por oxidación del material de sello, pérdida de adherencia con los bordes de las losas, levantamiento del material de sello por efecto del tránsito y movimientos de las losas, escasez o ausencia del material de sello y material de sello inadecuado.

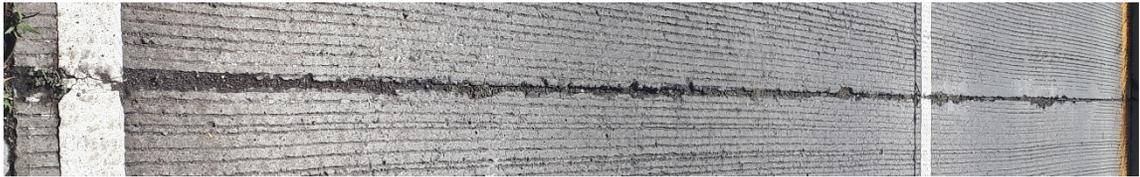


Figura 4.2 Sección de junta transversal, con deficiencia en el sello. Boulevard Orden de Malta: San Salvador.

Fisuración transversal: Consiste en una fisura de la losa que tiene ocurrencia aproximadamente perpendicular al eje del pavimento, o en forma oblicua a este, dividiendo la misma en dos planos.

La fisuración transversal es un tipo de daño el cual depende más del fenómeno de fatiga, sin embargo, al no haber un apoyo eficiente de la losa sobre la subbase (provocado por erosión de material) es posible que se genere dicha fisuración.



Figura 4.3 Sección de fisura transversal. Interconexión tramo I. San Salvador.

Erosión por bombeo: Se produce cuando hay movimiento del agua (con material de suspensión) ubicado debajo de la losa y luego se genera su eyección hacia la superficie como resultado de la presión generada por la acción de cargas. Generalmente este fenómeno es producido porque el material fino (subbase) es capaz de entrar en suspensión debido a la presencia de agua en las capas inferiores del pavimento y por deflexiones excesivas en los bordes y esquinas. Este fenómeno sería posible evitar que se produzca de manera que el sellado de la junta sea eficiente y no permita la infiltración de agua y que la subbase sea resistente a la erosión bajo tránsito pesado.



Figura 4.4 Sección de erosión por bombeo. Boulevard Orden de Malta. San Salvador



Figura 4.5 Sección de erosión por bombeo. Boulevard Orden de Malta. San Salvador.

Despostillamiento: Se presenta como desfragmentación que está generalmente localizada en los labios de las juntas o fisuras.

Suele ser el resultado de entrada de materiales incomprensibles en las juntas o fisuras, debido a que no existe sello de junta y que ya hay material erosionado.

El fenómeno es posible evitar que se produzca si se utilizan materiales sellantes adecuados que no permitan la infiltración de agua.



Figura 4.6 Sección de despostillamiento. Boulevard Orden de Malta. San Salvador.

Fisuras en bloque: Consiste en fracturamiento que divide a una losa en varias porciones menores a un metro cuadrado de área. Generalmente es producido por el fenómeno de fatiga, sin embargo, si las condiciones de soporte no son las adecuadas es posible que colabore para producir dicho fenómeno.

De manera que, si se emplea un soporte adecuado a la losa, es posible que se reduzca este tipo de daño.



Figura 4.7 Sección de fisuras en bloque. Boulevard Orden de Malta. San Salvador.

Escalonamiento: Es un tipo de falla provocada por el tránsito en la que una losa del pavimento a un lado de una junta presenta un desnivel con respecto a la adyacente. La falla es el resultado del ascenso a través de la junta o grieta del material suelto proveniente de la subbase, como también por depresión del extremo de la losa adyacente, al ser disminuido el soporte de la fundación.



Figura 4.8 Escalonamiento en losa de concreto. 50 Av. Norte, San Salvador.

Grietas de esquina: Consiste en una fisura que intercepta la junta que delimita la losa a una distancia menor a 1.3 m a cada lado medida desde la esquina. Las fisuras de esquina tienen la peculiaridad de extenderse verticalmente a través de todo el espesor de la losa.

Si bien es cierto que es un fenómeno el cual es producido por la fatiga, se da la combinación de ambos fenómenos (erosión y fatiga) ya que al no tener un buen apoyo la losa no existirá una buena transmisión de carga siendo favorable a que se produzcan altas deflexiones provocando así la grieta de esquina.



Figura 4.9 Sección de Grieta de esquina. Interconexión tramo II. San Salvador.

4.2 FATIGA EN PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO

El fenómeno de fatiga se define de las siguientes maneras:

- Fenómeno que se produce debido a las repeticiones de carga generando agrietamientos en razón que los esfuerzos cortantes y de tensión superan a los admisibles.
- Es el fenómeno por el cual los materiales pierden capacidad de resistir cuando están sometidos a cargas cíclicas con variación en el tiempo; este fenómeno se asocia con la disminución de la resistencia de un material en el tiempo cuando se le aplica esfuerzos dinámicos.
- La fatiga es el proceso de cambio estructural permanente, progresivo y localizado que ocurre en un material sujeto a tensiones y deformaciones VARIABLES en algún punto o puntos y que produce grietas o la fractura completa tras un número suficiente de fluctuaciones (ASTM).

La falla estructural producida por el fenómeno de fatiga en un pavimento se presenta cuando los materiales que conforman la estructura al ser sometida a repeticiones de carga por acción del tránsito sufren algún tipo de agrietamiento estructural relacionado con la deformación o tensión horizontal por tracción en la base de cada capa. Además, es importante recalcar que las fallas inician en la parte inferior de la losa y se va prolongando hasta la superficie, esto debido a que se presenta una tensión máxima en las fibras inferiores de la losa debido a los

esfuerzos soportados, que se va degradando y prolongando hacia arriba, finalizando en fallas estructurales en la obra.

Es importante mencionar también las fases en las cuales se producen fallas por acción del proceso de fatiga, entre ellas están:

Iniciación: Se genera cuando existe la presencia de una o más grietas en la losa, dichas grietas aparecen en cualquier punto de ella, pero en general tienen ocurrencia alrededor de alguna fuente de concentración de tensión y en la superficie exterior donde las variaciones de tensiones son más elevadas.

Propagación: Se produce cuando alguna o todas las grietas crecen por efecto de las repeticiones de cargas.

Rotura: en esta fase la estructura de pavimento continúa deteriorándose por el crecimiento de la grieta quedando tan reducida la sección neta de la losa que es incapaz de resistir la carga desde un punto de vista estático o dinámico produciéndose la rotura por fatiga.

De esta manera culmina el proceso de creación de una falla producto de la acción del fenómeno de fatiga, pero es importante conocer que factores son los que evidentemente intervienen en la gestación de una falla por fatiga, estos factores son:

Tránsito: Durante el periodo de tiempo que está en servicio y operación la estructura de pavimento, resulta fundamental el control sobre los vehículos de carga con el fin de que no excedan los límites en cuanto a lo que ha sido considerado en el diseño realizado.

Diseño: Generalmente los diseños de pavimentos están enfocados en la mecánica de los materiales, permitiendo un análisis teórico del comportamiento del pavimento ante las solicitaciones de carga.

Clima: En sí el factor es la radiación solar, de manera que al actuar de manera directa sobre la capa de rodadura de una estructura altera las propiedades al cambiar la temperatura interna del pavimento.

Lluvia: Es uno de los principales factores que afectan tanto al fenómeno de erosión como de fatiga, debido a que el agua penetra la capa de rodadura y se filtra hasta las capas inferiores debilitando la resistencia de la estructura causando así grietas en la losa.

Espesor de la losa de concreto: Este aspecto es importante de considerar debido a que entre más alto es el peralte de la losa, menores son los esfuerzos producidos en la parte inferior de ella.

Espaciamiento entre juntas transversales: Si en algún momento se incrementa el espaciamiento entre juntas esto facilita el incremento del agrietamiento de las losas, es por ello que las juntas se deben de implementar a una distancia acorde a lo requerido.

4.2.2 DAÑOS CAUSADOS POR FATIGA

Debido a lo que se observa en las carreteras de pavimentos rígidos de El Salvador, es posible clasificar los daños causados por fatiga de la siguiente manera:

Grietas transversales: Consiste en una fractura de la losa que tiene ocurrencia aproximadamente perpendicular al eje del pavimento, o en forma oblicua a este, dividiendo la misma en dos planos.

Las grietas transversales son un tipo de daño el cual depende principalmente del fenómeno de fatiga. Sin embargo, se debe producir de manera simultánea con el fenómeno de erosión de la subbase, provocando así las condiciones necesarias para que se produzca este tipo de falla.

Además, las grietas transversales no solo son producto de las causas antes mencionadas, sino que también pueden ser originadas por ausencia de juntas transversales o porque hay un espaciamiento excesivo entre ellas, pero con el acompañamiento de las repeticiones de carga se posibilita la presencia de grietas transversales.

El patrón de falla es posible combatirlo al realizar un diseño de espesor de calzada adecuado, capaz de soportar las repeticiones de cargas esperadas, también, debe ir de la mano con un excelente diseño de juntas transversales.



Figura 4.10 Grietas transversales. Interconexión tramo II. San Salvador.

Grietas longitudinales: Generalmente se presenta un fracturamiento de la losa que tiene ocurrencia aproximadamente paralela al eje de la carretera, dividiéndola la losa en dos planos. El patrón de falla se debe principalmente a la constante repetición de cargas pesadas, pérdida de soporte de la subbase y por la deficiencia o mal diseño de juntas longitudinales.

Es por eso que la mejor manera de poder evitar la ocurrencia de este suceso es realizando un diseño perfecto de juntas longitudinales, además del buen diseño del espesor de la losa.



Figura 4.11 Grieta longitudinal. Interconexión tramo I. San Salvador.

Fragmentación múltiple: Consiste en fracturamiento que divide a una losa en varias porciones menores a un metro cuadrado de área. Generalmente es producido por el fenómeno de fatiga y se produce por un deficiente soporte de la fundación, traduciéndose así en una capacidad de soporte deficiente de la losa. Es posible evitar que se produzca el fenómeno al realizar un buen diseño estructural, empleando materiales en la subbase contra la erosión y empleando un sistema de drenaje tal que evite las infiltraciones a la subbase.



Figura 4.12 Fragmentación múltiple. Interconexión tramo I. San Salvador.

Grietas de esquina: Consiste en una fisura que intercepta la junta que delimita la losa a una distancia menor a 1.3 m a cada lado medida desde la esquina. Las fisuras de esquina tienen la peculiaridad de extenderse verticalmente a través de todo el espesor de la losa.

Las grietas de esquina son un fenómeno producido por la fatiga, en este tipo de daño se da la combinación de ambos fenómenos (erosión y fatiga). Las esquinas son las más propensas a sufrir este fenómeno, es por ello que al debilitarse el material de la subbase y a partir de las constantes repeticiones de cargas, la transmisión de carga no es adecuada entre una losa y la adyacente, provocando así altas deflexiones en la esquina, culminando con la existencia de una grieta de esquina.



Figura 4.13 Sección de grietas de esquina. Interconexión tramo I. San Salvador.

4.3 ESFUERZOS EN LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO

Conocer los esfuerzos a los que están sometidos los pavimentos de concreto hidráulico es importante desde el punto de vista del diseño, ya que serán claves para la determinación del espesor de la losa. Los esfuerzos se pueden clasificar en tres categorías las cuales son:

- Esfuerzos debidos al tránsito.
- Esfuerzos debidos a la temperatura.
- Esfuerzos debidos al apoyo.

Esfuerzos debidos al tránsito

Los esfuerzos debidos al tránsito se han estudiado en tres posiciones de las llantas.

Esfuerzos en una esquina de la losa:

Se dan cuando la huella de una llanta es tangente en forma simultánea a dos orillas, es decir, la llanta está ubicada en una esquina. De esta manera, la losa trabaja en cantiléver y los esfuerzos principales de tensión se presentan en un ángulo de 45 grados respecto a las orillas y en la parte superior. A continuación, se presenta la ecuación de esfuerzos en la esquina de las losas de concreto hidráulico:

$$\sigma_c = \frac{3P}{d^2} \left(1 - \left(\frac{a}{r}\right)^{1.2}\right)$$

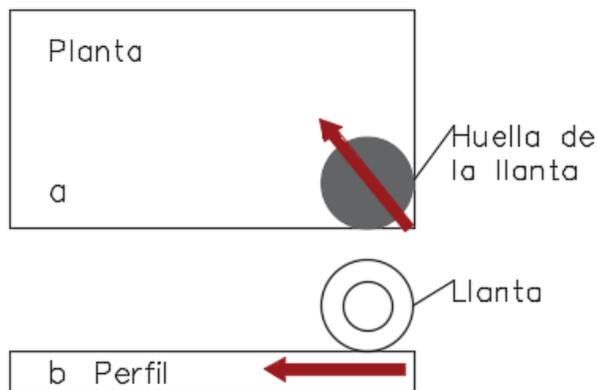


Figura 4.14 Esfuerzos en la esquina de la losa.

Esfuerzos en la orilla de la losa:

Se presentan cuando la huella de la llanta es tangente solo a una orilla de la losa; en este caso. El esfuerzo principal de tensión es paralelo a la orilla y se da en la parte inferior, como se presenta a continuación:

$$\sigma_c = \frac{0.572 P}{d^2} (4 \log_{10} \left(\frac{a}{\tau} \right) + 0.359)$$

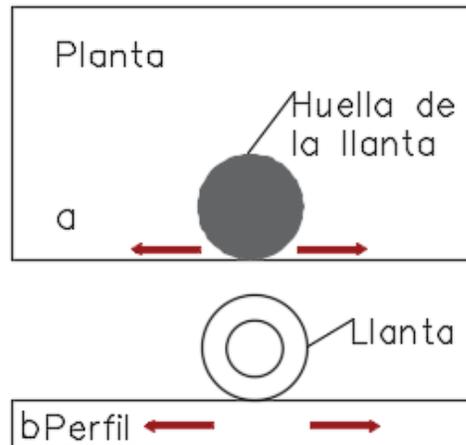


Figura 4.15 Esfuerzos en la orilla de la losa.

Esfuerzos al centro de la losa:

Se han estudiado los esfuerzos de la losa de concreto hidráulico cuando la llanta esta, en el centro de ella. En esta posición, los esfuerzos máximos de tensión se desarrollan en el lecho inferior de la losa y en forma radial, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\sigma_c = \frac{0.316 P}{d^2} (4 \log_{10} \left(\frac{\tau}{b} \right) + 1.0690)$$

$$b = \sqrt{1.6 a^2 + d^2 - 0.675d}$$

$$\tau = \sqrt{\frac{E d^3}{12 (1 + \nu^2)K}}$$

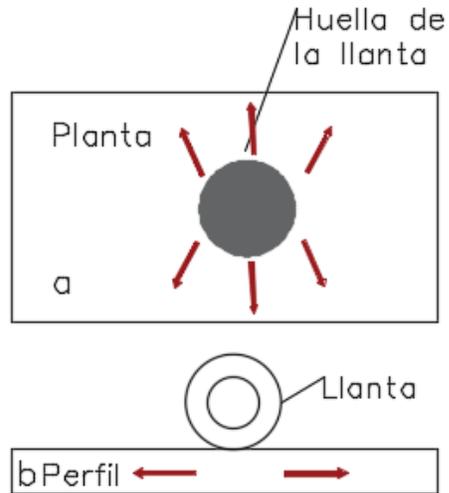


Figura 4.16 Esfuerzos al centro de la losa.

Para las fórmulas antes descritas:

P =Carga transmitida a la losa a través de la llanta (lb).

a, b = Semiejes de la elipse que representan la huella de la llanta.

a =Eje paralelo a la orilla o junta (in).

d =Espesor de la losa (in).

E =Módulo de elasticidad del concreto (lb/in).

U =Relación de Poisson del concreto igual a 0.15.

k =Módulo de reacción (lb/in³).

T =Radio de rigidez relativa (in).

Esfuerzos debidos a la temperatura

Cuando el cambio de temperatura es igual en la parte superior y en la parte inferior de la losa, se presentan los fenómenos de dilatación y contracción, pero si se encuentran en forma simultánea a diferentes temperaturas hay un gradiente que provoca la presencia de alabeos.

Si la temperatura de la superficie es menor que en la parte inferior, el alabeo es hacia arriba, es decir, la superficie de rodamiento se torna cóncava.

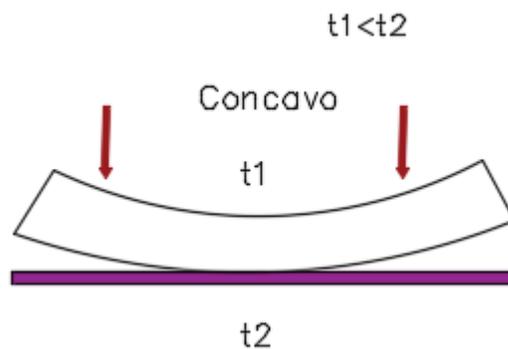


Figura 4.17 Superficie de rodamiento cóncava.

Si la temperatura de la superficie es mayor que en la parte inferior, el alabeo es hacia abajo, es decir, que la losa se hace convexa.

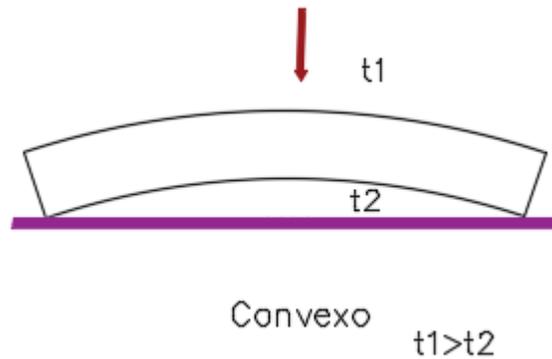


Figura 4.18 Superficie de rodamiento convexo.

Estos fenómenos de alabeo se alternan durante el día y la noche, por lo que se presentan las dos situaciones. Así mismo, cuando la superficie de rodamiento es cóncava los esfuerzos aumentan en un 20% en relación con las losas apoyadas en forma continua, el caso contrario es menos crítico, el efecto también es mayor cuando la subbase es más rígida.

Esfuerzos debidos al apoyo

Estos se presentan por la fricción que se desarrolla entre la losa y la subbase estos esfuerzos se deben a la disminución de movimiento de la losa, teniéndose esfuerzos de tensión que se pueden calcular con la siguiente fórmula.

$$F = W * c * \frac{L}{2}$$

F= Esfuerzos de tensión.

W= Peso de la losa por unidad de superficie.

L= Longitud de la losa.

C= Coeficiente de fricción igual a 1.2.

4.3.1 SOFTWARE UTILIZADOS PARA LA DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS EN PAVIMENTOS RÍGIDOS.

Entre los software más utilizados para la determinación de esfuerzos de pavimentos rígidos podemos mencionar el software EverFe y el ApRIGID, proporcionando datos importantes para el diseño de espesores de pavimentos rígidos.

EVERFE 2.25

EVERFE es un programa de elementos finitos para el dimensionamiento de pavimentos rígidos. Su creación es fruto de la colaboración entre las Universidades de Washington, Maine y el Washington Department of Transportation (WDOT).

La interfaz inicial del programa nos muestra una serie de componentes para realizar el análisis de un pavimento. En primer lugar, una cinta de opciones donde se pueden gestionar los archivos creados desde la pestaña "FILE", una pestaña para resolver los modelos que se introducen denominada "SOLVE" además una

pestaña de visualización de los resultados del análisis denominada “VISUALIZE”, por otro lado, presenta una pestaña de ayuda denominada “HELP” donde se puede encontrar información sobre cada elemento que debe introducirse en el programa.

Otro componente es la ventana de visualización de cambios aplicados al modelo, el cual se actualiza en tiempo real y posee tanto una vista de perfil como una vista en planta.

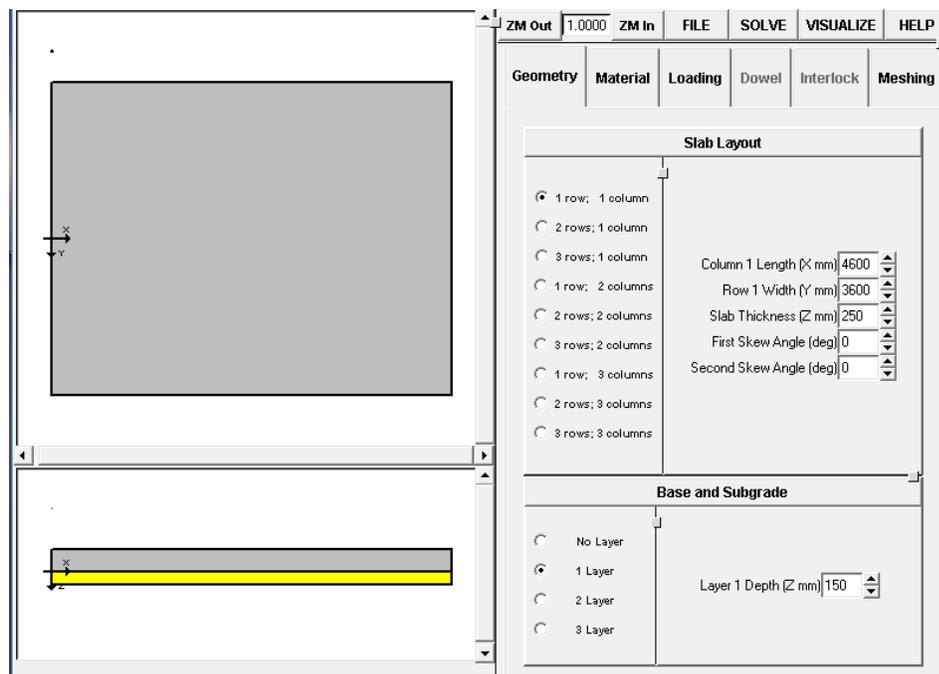


Figura 4.19 Interfaz inicial del programa EverFe.

Además de lo que se mencionó anteriormente el programa posee una cinta de opciones que se divide de la siguiente manera:

- Geometry
- Material
- Loading
- Dowel
- Interlock
- Meshing

Geometry

Esta pestaña nos permite introducir la configuración geométrica del pavimento a analizar, tanto la cantidad de carriles como la cantidad de losas, además de definir la cantidad de bases que tendrá, teniendo como restricción un máximo de 3 capas.

Geometry	Material	Loading	Dowel	Interlock	Meshing
Slab Layout					
<input checked="" type="radio"/> 1 row; 1 column <input type="radio"/> 2 rows; 1 column <input type="radio"/> 3 rows; 1 column <input type="radio"/> 1 row; 2 columns <input type="radio"/> 2 rows; 2 columns <input type="radio"/> 3 rows; 2 columns <input type="radio"/> 1 row; 3 columns <input type="radio"/> 2 rows; 3 columns <input type="radio"/> 3 rows; 3 columns		Column 1 Length (X mm) 4600 Row 1 Width (Y mm) 3600 Slab Thickness (Z mm) 250 First Skew Angle (deg) 0 Second Skew Angle (deg) 0			
Base and Subgrade					
<input type="radio"/> No Layer <input checked="" type="radio"/> 1 Layer <input type="radio"/> 2 Layer <input type="radio"/> 3 Layer		Layer 1 Depth (Z mm) 150			

Figura 4.20 Pestaña Geometry del programa EverFe.

Material

En esta pestaña podemos introducir las propiedades de la capa de rodadura en la sección “Slab” donde parámetros como el módulo de elasticidad (E), Coeficiente de Poisson, coeficiente térmico y la densidad del material se deben de definir. En la sección de “Base” como en la anterior, se deben definir las propiedades de la base y el coeficiente de reacción de la subrasante “k”.

Geometry	Material	Loading	Dowel	Interlock	Meshing
Slab:					
		E (MPa)	28000		
		nu	0.2		
		alpha (per deg C)	1.1e-005		
		density (kg/m ³)	2400		
<hr/>					
Base:					
		E (MPa)	5000		
		nu	0.2		
		density (kg/m ³)	0		
Slab/Base Interface:		<input checked="" type="checkbox"/> Bonded Base			
Dense Liquid Subgrade:		<input type="checkbox"/> Tensionless			
		K (MPa/mm)	0.03		

Figura 4.21 Pestaña “Material” del programa EverFe

Loading

Es la pestaña en la cual se introducen las cargas que soportara el pavimento, dichas cargas pueden variar dependiendo el tipo de eje seleccionado y la

cantidad de estos. Las cargas pueden ser definidas según 6 disposiciones (una rueda, eje de dos ruedas, eje de cuatro ruedas, dos ejes simples o dobles y ejes de múltiples ruedas). Para cada eje se debe introducir la carga y la posición en la que actuarán dependiendo del análisis a realizar, sea por fatiga o por erosión dicha distinción se hace con el criterio de la posición de las llantas sobre las losas, además posee una sección de gradiente térmico donde se deben definir las temperaturas que tendrá el pavimento permitiéndonos el ingreso de 3 cambios de temperatura.

Geometry	Material	Loading	Dowel	Interlock	Meshing
Single Wheel	Single Wheel Axle	Dual Wheel Axle	Single Wheel Tandem	Dual Wheel Tandem	Multi-Wheel Axle
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p style="text-align: center;">Top</p>  <p style="text-align: center;">Bottom</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p># of Temp. Changes <input type="text" value="2"/></p> <p>Temp. Change 1 (deg C) <input type="text" value="0"/></p> <p>Temp. Change 2 (deg C) <input type="text" value="0"/></p> </div> </div>					

Figura 4.22 Pestaña Loading del programa EverFe

Dowel

En esta pestaña se introduce el número de barras a utilizar, así como la posición que tendrán en la capa de rodadura. Otros aspectos a tomar en cuenta es la posición y las características de las juntas longitudinales que tendrá el pavimento.

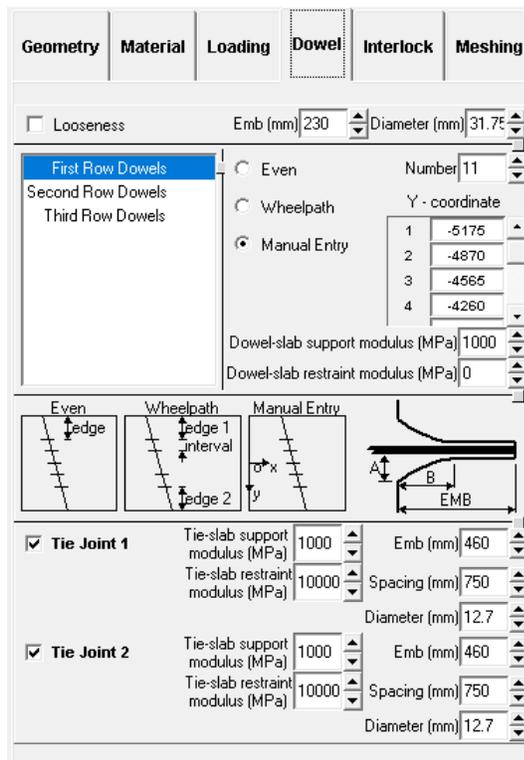


Figura 4.23 Pestaña Dowel del programa EverFe

Interlock

En esta pestaña se define si el análisis será un modelo lineal o un modelo no lineal además de definir el ancho de las juntas que tendrá el pavimento.

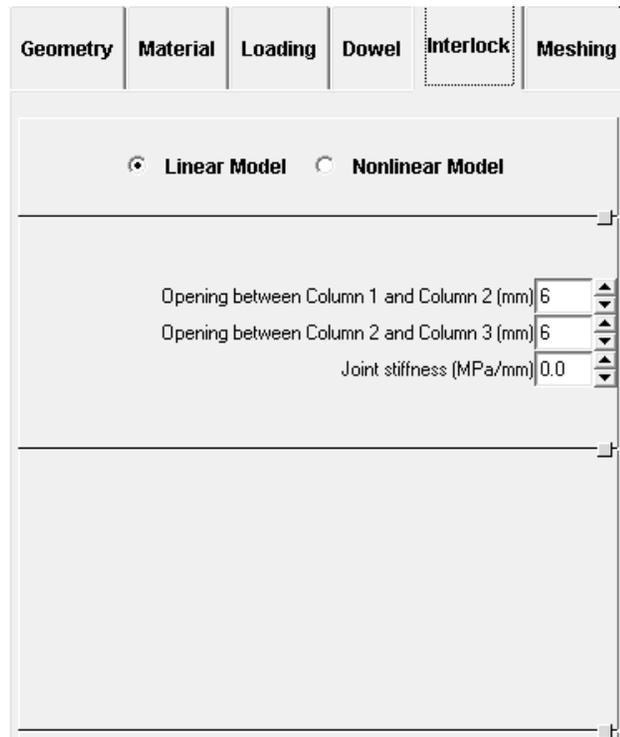


Figura 4.24 Pestaña Interlock del programa EverFe

Meshing

En esta pestaña se debe introducir la configuración del mallado para el análisis a realizar, entre menor sea la separación entre mallas el resultado será más exacto, es decir, se realiza un análisis de mayor calidad, siendo menor a medida que las mallas estén más separadas, existiendo la limitante del Ratio el cual no puede ser mayor que 5, este parámetro se eleva a medida que el análisis es más inexacto.

En esta misma pestaña se aclara la cantidad de memoria RAM que la computadora necesita para poder llevar a cabo el análisis, de este dato

dependerá la cantidad de tiempo que se llevara el programa en analizar todo lo que se ha introducido.

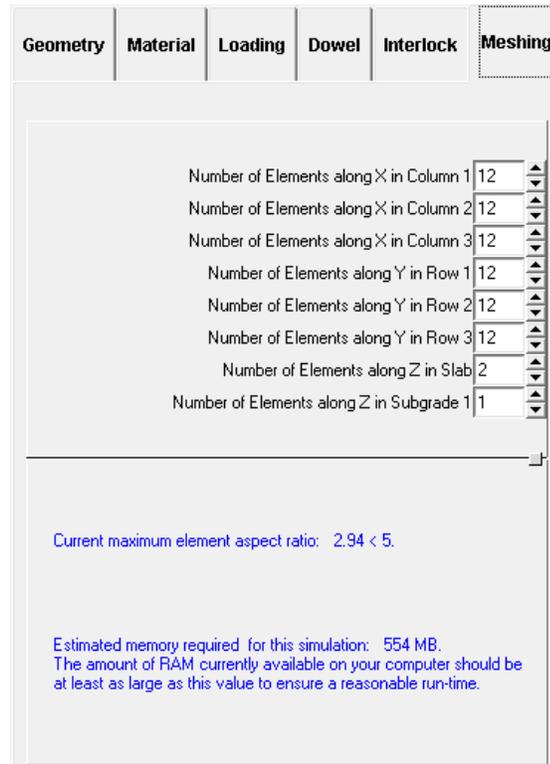


Figura 4.25 Pestaña Meshing del programa EverFe.

Luego de haber procesado la información necesaria con los datos de entrada, se procederá a ejecutar la solución del modelo, para lo cual se desplegarán las siguientes ventanas:

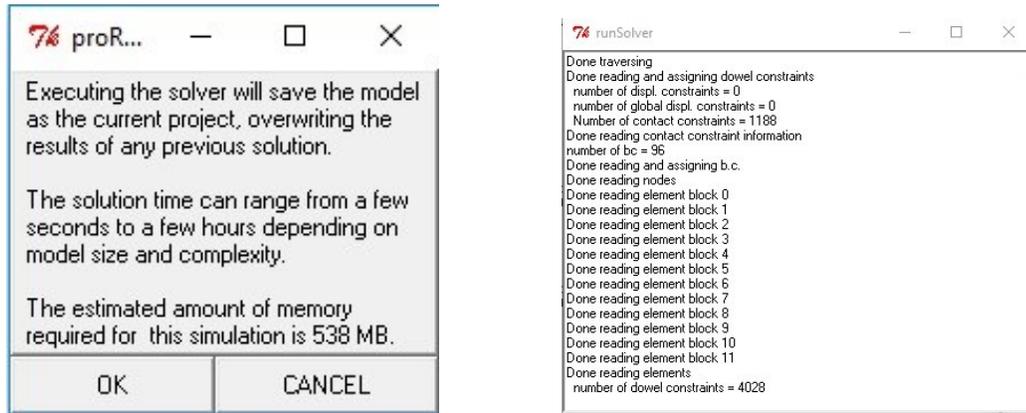


Figura 4.26 Ejecución del modelo en EverFe.

Finalmente, luego de procesar la información recabada, el programa presentará una interfaz con los resultados de los esfuerzos y deformaciones aplicados en cada losa, como se muestra a continuación:

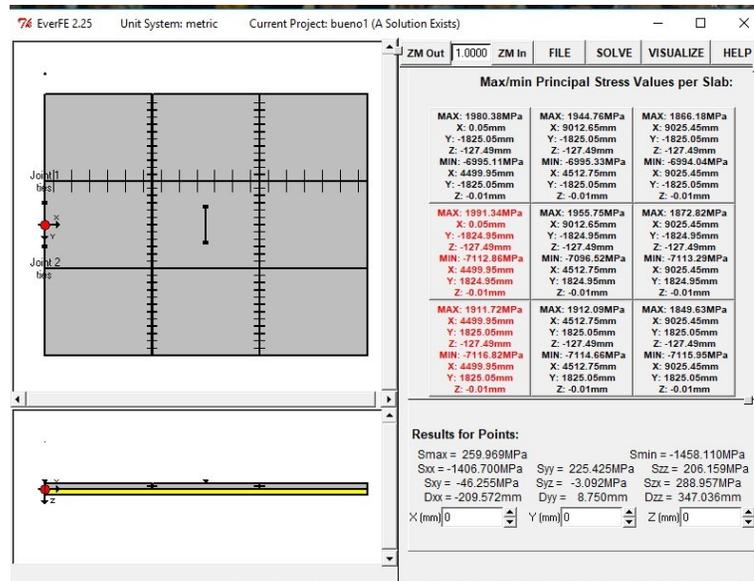


Figura 4.27 Resultados obtenidos a partir del software EverFe.

ApRigid

ApRigid es una herramienta para el cálculo de estructuras de pavimento rígido, la cual fue desarrollada para facilitar la determinación de las respuestas mecánicas críticas requeridas, en el proceso de diseño empírico mecanicista de pavimentos rígidos.

Figura 4.28 Interfaz del programa ApRIGID

El software ApRIGID nos muestra una interfaz amigable al usuario dando la opción de seleccionar el sistema de unidades a utilizar siendo las opciones el sistema internacional de unidades o el sistema inglés de unidades. En el software se pueden realizar análisis individuales de pavimentos o el de varias estructuras de manera simultánea mediante la incorporación de listas de trabajo, los análisis se pueden realizar con dos procedimientos: el procedimiento de regresión lineal múltiple o mediante el procedimiento de red neuronal artificial.

El análisis de las estructuras de pavimentos depende de 8 factores los cuales son:

- Separación entre juntas (L).
- Módulo elástico del concreto (E).
- Espesor de la losa (h).
- Diferencial térmico (Δt).
- Coeficiente Subrasante (k).
- Módulo elástico de la base (Eb).
- Diámetro de dovelas (\emptyset).
- LTE (Load Transfer Efeciciency %).

A continuación, se muestra el cuadro de resultados que proporciona el programa ApRIGID, básicamente indica el tipo de análisis que realizó y muestra tres figuras de los resultados de esfuerzos y deformaciones en la estructura de pavimento analizada.

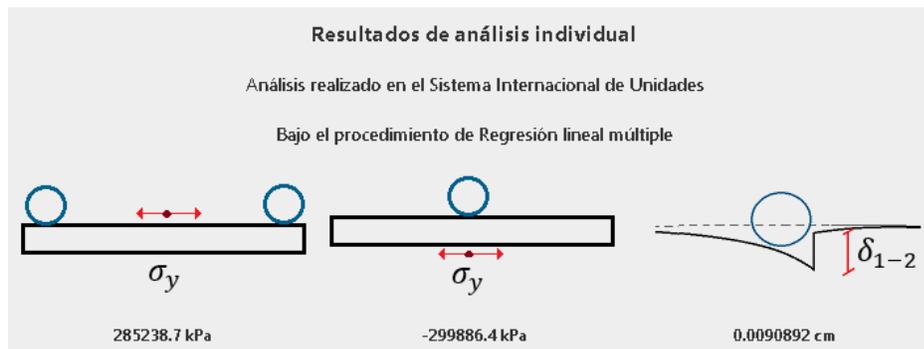


Figura 4.29 Cuadro de resultados de ApRIGID

Para el análisis múltiple se deben crear listas de trabajo que describan el número de estructuras que se analizarán, la introducción de los 8 parámetros se debe dar mediante un archivo de texto con extensión .txt, para garantizar el correcto ingreso de los datos se recomienda tabular los datos en Excel y posteriormente copiarlos al archivo de texto. La introducción de datos debe seguir las siguientes reglas:

- Cada línea describe una estructura.
- Se admiten únicamente caracteres numéricos
- Se debe utilizar el separador decimal de punto.
- Cada parámetro debe separarse mediante una tabulación.

Los parámetros que describen cada estructura deben seguir un orden preestablecido como se muestra a continuación:

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda			
12	4000	6	-18	100	50	0	10
12	4000	6	-18	100	50	0	50
12	4000	6	-18	100	50	0	80
12	4000	6	-18	100	50	1	10
12	4000	6	-18	100	50	1	50
12	4000	6	-18	100	50	1	80
12	4000	6	-18	100	50	1.5	10
12	4000	6	-18	100	50	1.5	50

↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑

L Ec h Δt k Eb ∅ LTE

Figura 4.30 Listas de trabajo con extensión .txt

4.4 DESCRIPCIÓN DE LAS METODOLOGÍAS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO A IMPLEMENTAR.

Anteriormente, en este capítulo, se presentó la teoría básica de erosión y fatiga, en la cual es notoria la importancia que dichos parámetros representan. Además, se recalcó la importancia de verificar esfuerzos y deflexiones máximas en las losas de concreto hidráulico, es por ello que luego de estar al tanto de las bases fundamentales se procede a conocer de una manera teórica las metodologías PCA y MEPDG de diseño que van a ser implementadas para revisar los diseños proporcionados por el MOP. Además, para cada metodología se ha seleccionado un software de apoyo, los cuales también son descritos a continuación.

4.4.1 METODOLOGÍA DE DISEÑO PCA

A continuación, se presentan los aspectos más relevantes sobre el método de diseño de pavimentos de la Portland Cement Association (PCA) en su edición de 1984. En este método se utilizan criterios empíricos debido a la falta de conocimientos que se tenía en ese momento sobre el comportamiento de los diferentes elementos o materiales que conforman una estructura de pavimento rígido. Cabe mencionar que el método de la PCA es exclusivamente para el diseño de pavimentos de concreto hidráulico.

El método fue desarrollado por P. Fordyce y R. Packard para pavimentos de concreto simple, con juntas y sin dovelas, basados en los análisis desarrollados por Westergard y presentándolos en cartas de influencia realizadas por Pickett y Ray. Los resultados permitían seleccionar un espesor basado en consideraciones de daño acumulado en fatiga. Posteriormente, los resultados de la AASHO Road Test permitieron calibrar la metodología para el diseño.

Además, la metodología de diseño fue mejorada con la llegada de las computadoras y el desarrollo de la metodología de elemento finito, los procedimientos de diseño incluyeron la influencia de barras de dovela y del confinamiento lateral.

En 1984 los investigadores Tayabji, Colley y Packard desarrollaron un procedimiento de diseño considerando además de la fatiga, los efectos de bombeo, con este procedimiento la PCA introdujo su nueva metodología de diseño basada en un análisis de elemento finito, la metodología permitió considerar el uso de dovelas en juntas y de elementos para dar apoyo lateral a la losa de concreto.

El método publicado en 1984 se basa en dos criterios específicos: el primero relativo a la resistencia, es decir, a la fatiga del concreto el cual reconoce que el pavimento puede fallar debido a excesivas repeticiones de carga y el otro criterio es relativo a la erosión de la base el cual reconoce que el pavimento puede fallar por un excesivo bombeo (erosión del terreno de soporte de la losa de concreto)

y diferencias de elevaciones en las juntas. En el primer caso, se supone que la carga máxima se aplica en medio de la losa justo sobre la junta longitudinal que da la tensión máxima con la losa. En el segundo caso, se supone que la carga máxima se aplica en una esquina de la losa para generar deflexión máxima de la losa.

Un aspecto a tomar en consideración es que la PCA, sólo consideran los vehículos pesados, tales como camiones, autobuses, etc. en el cálculo de la estructura, es decir vehículos con carga superior a 5 ton.

El diseño de espesores se realiza basándose principalmente en cinco factores de acuerdo al manual de diseño de la PCA, (Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements) los cuales son:

1. Resistencia a la flexión del concreto, (Módulo de Ruptura, MR).
2. Soporte de la subrasante, o de la combinación de subbase-subrasante, (k).
3. Periodo de diseño.
4. Los pesos, frecuencias, y tipo de tráfico pesado que el pavimento soportará. (Tráfico).
5. Factor de seguridad para las cargas, (FS).

A continuación, se describe cada uno de los factores:

1. Resistencia a la flexión del concreto

La resistencia a la flexión es una medida de la resistencia a la tracción del concreto. Se obtiene mediante la aplicación de cargas a vigas de concreto de 6 in x 6 in (150 mm x 150 mm) de sección transversal y un claro de al menos tres veces el espesor; la resistencia a la flexión se expresa como el módulo de ruptura y es determinada mediante el método de ensayo ASTM C78 (cargada en los puntos tercios).

2. Soporte de la subbase y de la subrasante

El soporte de la subbase y de la subrasante se define en términos del módulo de reacción de la subrasante (k), el cual corresponde a la carga aplicada (libras) en un área (in^2) cargada (un plato de 30 in de diámetro) dividida entre la deflexión producida ante dicha carga (in).

3. Periodo de diseño

El periodo de diseño seleccionado interviene en el diseño del espesor, ya que determina la cantidad de años que el pavimento debe funcionar desempeñándose adecuadamente, y por lo tanto determina también la cantidad de tránsito pesado que debe soportar el pavimento.

4. Tráfico

El número y pesos de cargas por ejes pesados esperados durante el periodo de diseño son factores importantes en el diseño de espesores de pavimentos de concreto.

La información referente al tráfico es empleada para determinar el número de repeticiones esperadas de cada tipo de eje durante todo el periodo de diseño. Para poder conocer estos valores tendremos que conocer varios factores referentes al tránsito, como lo son el tránsito promedio diario anual (TPDA), el porcentaje que representa cada tipo de eje en el TPDA, el factor de crecimiento del tráfico, el factor de sentido, el factor de carril y el período de diseño.

Las variables anteriormente mencionadas son usadas en la siguiente ecuación:

$$Re = TPDA \times \% \text{ Tipo de eje} \times F_{\text{Sentido}} \times F_{\text{Carril}} \times P_{\text{Diseño}} \\ \times F_{\text{Crecimiento Anual}} \times 365$$

5. Factores de seguridad para las cargas.

El método de diseño exige que las cargas reales esperadas se multipliquen por factores de seguridad de carga (FSC o LSF por sus siglas en inglés, Load Security Factor), la PCA recomienda los siguientes:

- Para vías interestatales y otros proyectos multicarril, donde se espera un flujo de tránsito ininterrumpido, con un alto volumen de tránsito pesado, utilizar un LSF de 1.2.
- Para autopistas y arterias principales donde se espera un volumen moderado de tránsito pesado, utilizar un LSF de 1.1.
- Para caminos, calles residenciales, y otras vías que soportarán bajos volúmenes de tránsito pesado, utilizar un LSF de 1.0.
- La consideración de resistencia a la flexión del concreto se aplica en el procedimiento de diseño para el criterio de fatiga, la cual controla el agrietamiento del pavimento sujeto a cargas repetitivas de tráfico pesado.

A continuación, se presenta el cálculo del daño por de erosión y fatiga por el método PCA.

Análisis del espesor requerido por fatiga

Para este análisis primero se debe calcular el número permisible de repeticiones de carga (N_f) obtenidas de las funciones de transferencia desarrolladas por la PCA, a través de las siguientes formulas.

$$\text{Log } N_f = 11.737 - 12.077 \frac{\sigma}{S_c} \quad \text{Para } \frac{\sigma}{S_c} \geq 0.55$$

$$N_f = \left(\frac{4.2577}{\frac{\sigma}{S_c} - 0.4325} \right)^{3.268} \quad \text{Para } 0.45 < \frac{\sigma}{S_c} < 0.55$$

$$N_f = \text{Ilimitado} \quad \text{Para } \frac{\sigma}{s_c} \leq 0.55$$

Siendo:

σ : Esfuerzo de borde en la losa.

s_c : Modulo de rotura del concreto.

En este análisis, los esfuerzos (σ) a utilizarse en la función de transferencia desarrollada por la PCA, son los esfuerzos de borde obtenidos de la modelación en EverFe, producidos por cargas ubicadas en la mitad de una losa es decir la junta longitudinal de construcción, además se deben definir los siguientes factores se considera un valor de módulo de reacción de la subrasante (k), se determina un valor de eficiencia de transferencia de carga (LTE), el módulo de elasticidad del concreto (E_c), el número pronosticado de repeticiones de carga por eje durante el periodo de diseño (n_f), el numero permisible de repeticiones.

Posteriormente se procede a hacer una tabla para un tamaño de losa establecido y un espesor de análisis donde se determinará el daño relativo $D_r = n_f / N_f$ acumulado el cual debe ser menor que 1 o 100% si se calcula en porcentaje para que en esas condiciones el diseño de espesor de losa sea aceptable.

Peso del eje Tn	Tipo de eje	σ Mpa	f_s	σ Mpa	S_c	σ/S_c	N_f	n_f	D_r
1.0	Simple	0.28	0.894	0.25	3.53	0.071	ilimitado	8.25E+06	0.00
2.5	Simple	0.71	0.894	0.63	3.53	0.178	ilimitado	8.25E+06	0.00
3.0	Simple	0.85	0.894	0.76	3.53	0.215	ilimitado	1.34E+05	0.00
3.9	Simple	1.08	0.894	0.96	3.53	0.272	ilimitado	1.76E+05	0.00
6.0	Simple	1.66	0.894	1.48	3.53	0.419	ilimitado	1.89E+05	0.00
7.0	Simple Dual	1.37	0.894	1.22	3.53	0.346	ilimitado	1.34E+05	0.00
9.2	Simple Dual	1.80	0.894	1.61	3.53	0.456	2.40E+07	1.76E+05	0.01
11.0	Simple Dual	2.15	0.894	1.92	3.53	0.544	1.48E+05	1.43E+05	0.97
20.0	Tándem	1.43	0.894	1.28	3.53	0.363	ilimitado	6.01E+04	0.00
Total Dr									0.98

Tabla 4.1 Ejemplo de cálculo de daño acumulado por fatiga para una losa con un espesor propuesto de 20.5 cm

Análisis del espesor requerido por erosión

Para este análisis el primer paso es determinar número permisible de repeticiones de carga (N_e) obtenidas de las funciones de transferencia desarrolladas por la PCA para el deterioro por erosión.

A continuación se muestran las ecuaciones para el cálculo del porcentaje de erosión.

$$\text{Log } N = 14.524 - 6.777(C_1 P - 9.0)^{0.103}$$

$$P = 268.7 \frac{\rho^2}{h * k^{0.73}}$$

$$p=w.k$$

Donde:

N= Número de repeticiones permisibles

ρ = Presión sobre el apoyo de la esquina de la losa, en libras pulgada cuadrada

$\rho = kw =$ Caso de cimentación líquida (Winkler)

h= Espesor de la losa en pulgadas

k= Módulo de reacción del apoyo, en lb/pulg²

C₁= Factor de ajuste, 1 para sub bases sin tratar y 0.9 para sub bases estabilizadas.

La ecuación del daño por erosión es:

$$Daño\ por\ erosión, (\%) = 100 \sum_{i=1}^m \frac{C_2 n_i}{N_i}$$

C₂= 0.06 pavimentos sin acotamientos

C₂=0.94 pavimentos con acotamientos sujetos

En este análisis se deben definir las siguientes variables, los factores de ajuste C1 y C2, el módulo de reacción de la subrasante (k), la eficiencia de transferencia de carga LTE, el numero pronosticado de repeticiones de carga por eje durante el periodo de diseño (N_e) por otro lado cabe mencionar que las deformaciones (w) a utilizarse en la función de transferencia desarrollada por la PCA, son las deformaciones de esquina producidos por cargas ubicadas en la esquina junta longitudinal-junta transversal de una losa de tamaño definido también Para el procedimiento el espesor de la losa debe ser tal que el porcentaje de daño por erosión sea menor que 100%.

Peso del eje T_n	Tipo de eje	δ mm	P Mpa	P (Phk)	N_e	n_e	Daño
1.0	Simple	0.10	0.004	0.288	Ilimitado	8.25+06	0.00
2.5	Simple	0.25	0.010	1.797	Ilimitado	8.25+06	0.00
3.0	Simple	0.30	0.012	2.588	Ilimitado	1.34+05	0.00
3.9	Simple	0.36	0.014	3.842	Ilimitado	1.76+05	0.00
6.0	Simple	0.56	0.022	9.092	1.67E+09	1.89+05	0.01
7.0	Simple Dual	0.56	0.022	9.225	5.16E+08	1.34+05	0.02
9.2	Simple Dual	0.74	0.029	15.934	1.78E+06	1.76+05	9.26
11.0	Simple Dual	0.88	0.035	22.779	4.41E+05	1.43+05	30.51
20.0	Tándem	0.89	0.036	23.521	3.95E+05	6.01+05	14.29
						Total Dr	54.10

Tabla 4.2 Ejemplo de cálculo de daño acumulado por erosión para una losa con un espesor propuesto de 20.5 cm

4.4.1.1 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE PCACÁLCULO.

El software PCA cálculo es un software creado por Portland Cement Association en 1984, para el diseño de pavimentos de concreto basado en el método de diseño PCA siendo de uso libre. El software es compatible con las últimas versiones de Windows y posee un mayor grado de precisión ya que se desarrolló a partir de las ecuaciones originales del método PCA dejando de lado el uso de los nomogramas que el método presenta. PCACálculo permite incluir todas las variables del método PCA, enfocándose en los parámetros centrales que el método considera de fatiga y erosión, evaluando distintas alternativas de diseño presentando en su interfaz gráfica las variaciones de la erosión y fatiga en función del espesor de la losa, el módulo de reacción de la subbase-subrasante, el módulo de ruptura del concreto, obteniendo así recomendaciones de las dimensiones y separación de las barras de anclaje y de las barras de transferencia de carga.

El software PCACálculo se desarrolló bajo el lenguaje Matlab y para el diseño de la interfaz de usuario se utilizó Graphical User Interface (GUI).



Figura 4.31 Interfaz principal de PCACálculo.

Descripción de la interfaz:

Se divide en cinco módulos principales:

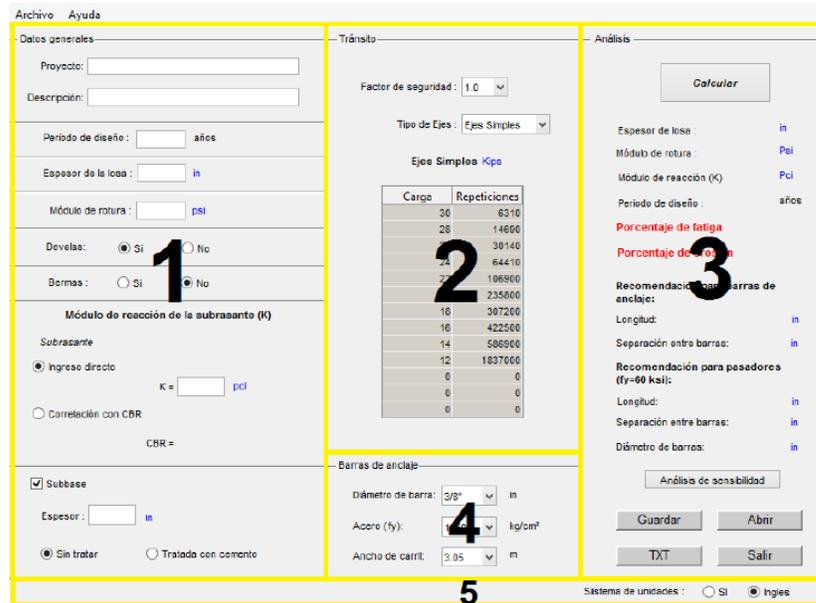


Figura 4.32. Módulos principales de PCACálculo

Módulo 1: Contiene las respectivas casillas para ingresar los datos generales del proyecto, espesor de la losa, resistencia a flexión del concreto y las características del suelo.

Módulo 2. Conformado por las características del tránsito como las cargas por eje, las repeticiones y el factor de seguridad.

Módulo 3. Muestra los resultados de la iteración realizada a partir de los datos ingresados en los anteriores módulos.

Módulo 4. Permite escoger los datos generales de las barras de anclaje.

Módulo 5. Permite escoger el sistema de unidades entre el Sistema Internacional y el Sistema Ingles.

Datos generales del proyecto

Se deben conocer las siguientes características para diseñar el pavimento

- Espesor de losa
- Módulo de rotura del concreto
- Unión con dovelas
- Bermas
- Módulo de reacción
- Factor de seguridad de carga
- Tránsito
- Barras de anclaje

Proyecto nuevo**Sistema de unidades**

El programa permite utilizar dos sistemas de unidades: el Sistema Internacional (SI) o el sistema inglés. Para cambiar el sistema de unidades selecciona la opción de su interés en la parte inferior del módulo 5.

Datos generales del proyecto.

Se ingresa el nombre del proyecto y una breve descripción del mismo.

Periodo de diseño

Corresponde al periodo de análisis de tránsito. El valor ingresado no afecta los cálculos dado que el programa trabaja con repeticiones de carga ingresadas en el módulo 2 (Transito)

Espesor de losa

En este campo se ingresa el espesor de losa que desea evaluar. El rango de espesor varía normalmente entre 100 y 350 mm en el sistema internacional, o entre 4 y 14 pulgadas en el sistema inglés.

Módulo de rotura

Se ingresa la resistencia a flexión del concreto a los 28 días. Los valores usuales varían entre 3.8 a 4.5 MPa (550-650 psi)

Dovelas y bermas

Se escoge el tipo de transmisión de carga, con o sin dovelas y la presencia o no de bermas.

Módulo de reacción del conjunto subrasante-subbase

Se puede ingresar el valor del módulo de reacción k de la subrasante. Otra alternativa es ingresar la capacidad de soporte (CBR) de la subrasante y el programa estima el valor de k con base en las recomendaciones de la PCA.

Factor de seguridad (FS)

En la parte de tránsito (módulo 2) se encuentra un menú desplegable con los valores a seleccionar del factor de seguridad.

Tránsito, cargas y repeticiones.

Las cargas se encuentran en unidades kips para sistema inglés y kN en el sistema internacional. El programa despliega por defecto valores de carga que pueden ser modificados.

Barras de anclaje

Para calcular la longitud y la separación de las barras de anclaje se ingresa las propiedades de la barra, diámetro, resistencia a la fluencia, indicar el ancho de carril que afecta la separación entre las barras.

Cálculo de parámetros de diseño

En el botón CALCULAR en el módulo 3, se realizan los cálculos y se muestran en el resumen de los resultados, las propiedades del pavimento y los porcentajes de fatiga y erosión. De la misma manera, se presentan las recomendaciones de longitud y separación de las barras de anclaje y dovelas. También reporta el valor del módulo de reacción (k) del conjunto subrasante-subbase. Finalmente, genera un reporte de extensión “.txt” con los resultados de las alternativas ingresadas por los usuarios. El formato en el que lo presenta es similar al formato propuesto por el método PCA.

Guardar.

Para guardar el proyecto se realiza oprimiendo el botón GUARDAR del panel.

The screenshot displays the PCACálculo software interface, which is divided into three main sections: Datos generales, Tránsito, and Análisis.

Datos generales: Includes fields for Proyecto, Descripción, Período de diseño (años), Espesor de la losa (in), Módulo de rotura (psi), and options for Dovelas and Bermas (Si/No). It also features a section for the Módulo de reacción de la subrasante (K) with options for Ingreso directo and Correlación con CBR.

Tránsito: Shows Factor de seguridad (1.0), Tipo de Ejes (Ejes Simples), and a table of Ejes Simples (kips) with columns for Carga and Repeticiones.

Carga	Repeticiones
30	6310
28	14690
26	30140
24	64410
22	106900
20	235800
18	307200
16	422500
14	586900
12	1837000
0	0
0	0
0	0

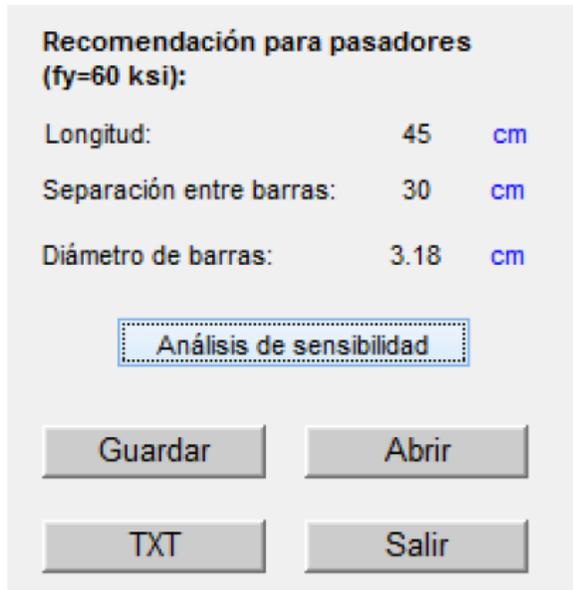
Análisis: Contains the Calculador button and output results for Espesor de losa (in), Módulo de rotura (psi), K del conjunto (pci), Período de diseño (años), Porcentaje de fatiga, and Porcentaje de erosión. It also provides recommendations for barras de anclaje (Longitud, Separación entre barras) and pasadores (fy=60 ksi) (Longitud, Separación entre barras, Diámetro de barras).

Additional controls include Subbase (checked), Espesor (in), and options for Sin tratar or Tratada con cemento. The Barra de anclaje section includes Diámetro de barra (3/8" in), Acero (fy) (280 MPa), and Ancho de carril (3.05 m). Buttons for Guardar, Abrir, TXT, and Salir are present, along with a Sistema de unidades selector (SI/Inglés).

Figura 4.33 Parámetros de entrada y de salida en PCACálculo.

Análisis de sensibilidad

El programa realiza un análisis de sensibilidad de la estructura del pavimento rígido para lo cual se oprime el botón de análisis de sensibilidad en el módulo 3. A través de este análisis se puede ver el comportamiento del pavimento si varía el módulo de reacción de la subrasante, módulo de rotura del concreto y el espesor de la losa.



Recomendación para pasadores
(fy=60 ksi):

Longitud:	45	cm
Separación entre barras:	30	cm
Diámetro de barras:	3.18	cm

Análisis de sensibilidad

Guardar Abrir

TXT Salir

Figura 4.34 Interfaz del análisis de sensibilidad.

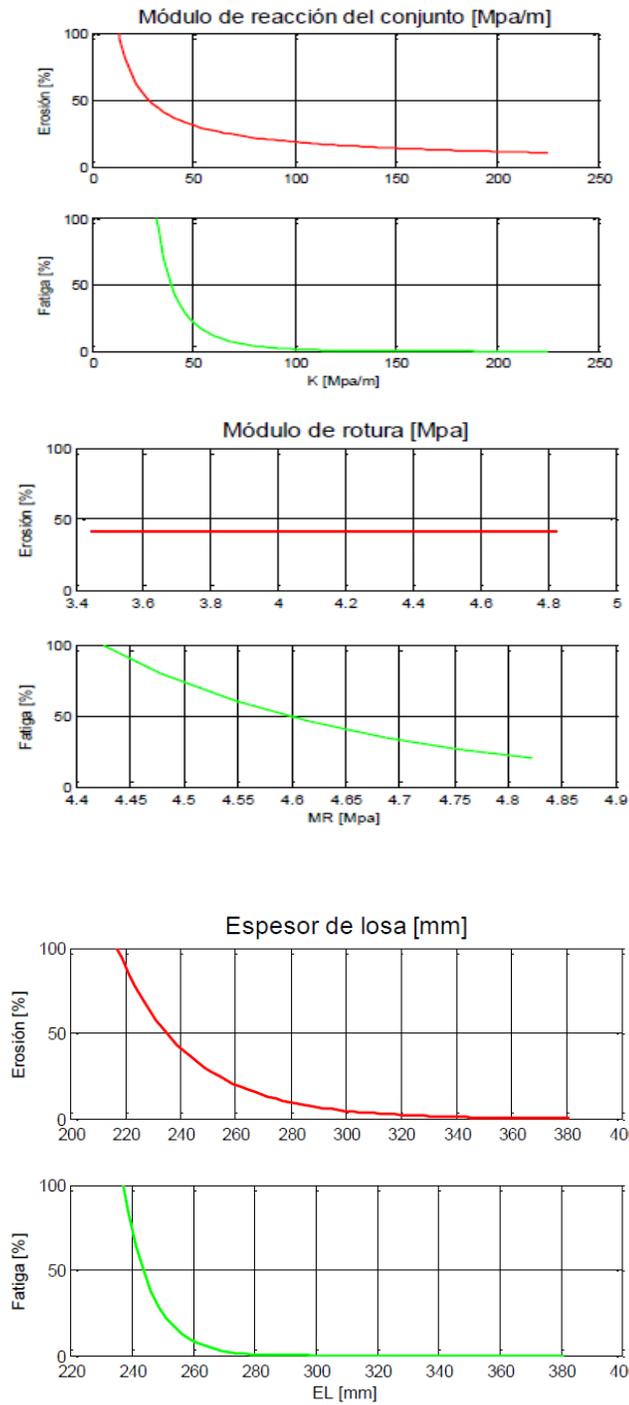


Figura 4.35 Gráficos del resultado de análisis de sensibilidad.

4.4.2 METODOLOGÍA DE DISEÑO MEPDG.

La guía de diseño mecanicista empírica MEPDG fue desarrollada en los Estados Unidos tal como las versiones anteriores de la AASHTO, por lo que los modelos de desempeño que desarrolla son exclusivos de las condiciones de su país de origen.

La guía toma en consideración las variables de entrada con un procedimiento de diseño de analizar una variedad de capas estructurales con distintos arreglos y tipos de diseño, incluyendo el espaciamiento entre juntas, dovelas, configuración del hombro, subbase y drenaje. El diseño se completa de forma iterativa analizando los diseños de pavimentos identificando el que satisfaga todos los criterios solicitados (falla en la junta, falla en las losas, IRI, etc.) en el periodo de análisis establecido.

Adicionalmente a los tramos de prueba que deben realizarse para el diseño de pavimentos rígidos, se deben establecer las condiciones del sitio del proyecto tales como las propiedades del terreno natural, incluyendo la presencia de los estratos rocosos, el clima, el tránsito etc. De la misma manera, se deben definir variables relacionadas con la construcción tal como la serviciabilidad inicial, IRI, el tiempo en el que la carretera será abierta al tránsito y el espesor de la losa.

Es importante mencionar que para las variables que considera este método, se pueden ingresar con diferentes niveles de confiabilidad. Es por ello que los

distintos niveles de entrada de datos varían dependiendo de los parámetros de diseño. La elección del nivel puede influir y tener un efecto significativo en el diseño del proyecto, en los costos y en la confiabilidad del mismo. La sensibilidad del análisis puede ser usada para determinar que parámetros deben ser utilizados con mayor precisión dependiendo del tipo de proyecto a realizar.

Para los diseños de pavimento se pueden escoger 3 distintos niveles de calidad de información, los cuales se detallan a continuación:

Nivel 1: Requiere valores de entrada específicos del sitio o material para el proyecto a través de pruebas o medidas. Un ejemplo de este nivel es la información que incluye propiedades obtenidas en pruebas de laboratorio y medidas de volúmenes de tránsito en el sitio del proyecto.

Nivel 2: Hace uso de correlaciones para determinar los valores requeridos de entrada. Por ejemplo, la información que incluye el módulo resiliente de la subbase o sus respectivos materiales obtenidos con la prueba del CBR usando correlaciones empíricas.

Nivel 3: Utiliza valores establecidos de la experiencia local para definir los datos de entrada. Ejemplos de este nivel es el uso de la clasificación de suelos AASHTO para determinar el módulo resiliente o el uso de un tipo de carretera y cierto tipo de clasificación vehicular para determinar la distribución del peso axial.

Además, es necesario definir todas las variables concernientes al diseño del pavimento y las variables que se verán mayormente afectadas e influenciadas en el desempeño del pavimento.

Variables de diseño en método MEPDG

Las variables de diseño del método MPEDG deben definirse con exactitud, ya que el pavimento propuesto debe cumplir todos los requerimientos para su buen desempeño estructural y funcional. Es por ello que el método MEPDG requiere un proceso de iteración para el pavimento que cumpla con las variables que se solicitan.

Las variables que exige el método son las siguientes:

Tránsito, Espectros de carga, Periodo de diseño, Tasa de crecimiento, TPDA, Factores de ajuste mensual , Distribución de clase vehicular, Factores de distribución por carril, Ancho de carril, Número de ejes, Desvío estándar de la deriva del tránsito, Configuración del eje, Velocidad operativa de los vehículos, Clima, Propiedades generales y térmicas, Espesor de capa, Coeficiente de Poisson, Propiedades relacionadas al concreto, Propiedades de resistencia y rigidez, Módulo de ruptura, Módulo estático de elasticidad, Módulo de reacción de la subrasante.

El método mecanicista empírico propone el planteamiento de alternativas de estructuras de pavimento que cumplan con los niveles de servicio requeridos, basándose en la verificación del desempeño estructural y funcional a través de

los niveles de deterioros en el pavimento, para determinar las respuestas estructurales del pavimento propuesto.

El siguiente diagrama muestra el proceso que exige el método MEPDG:

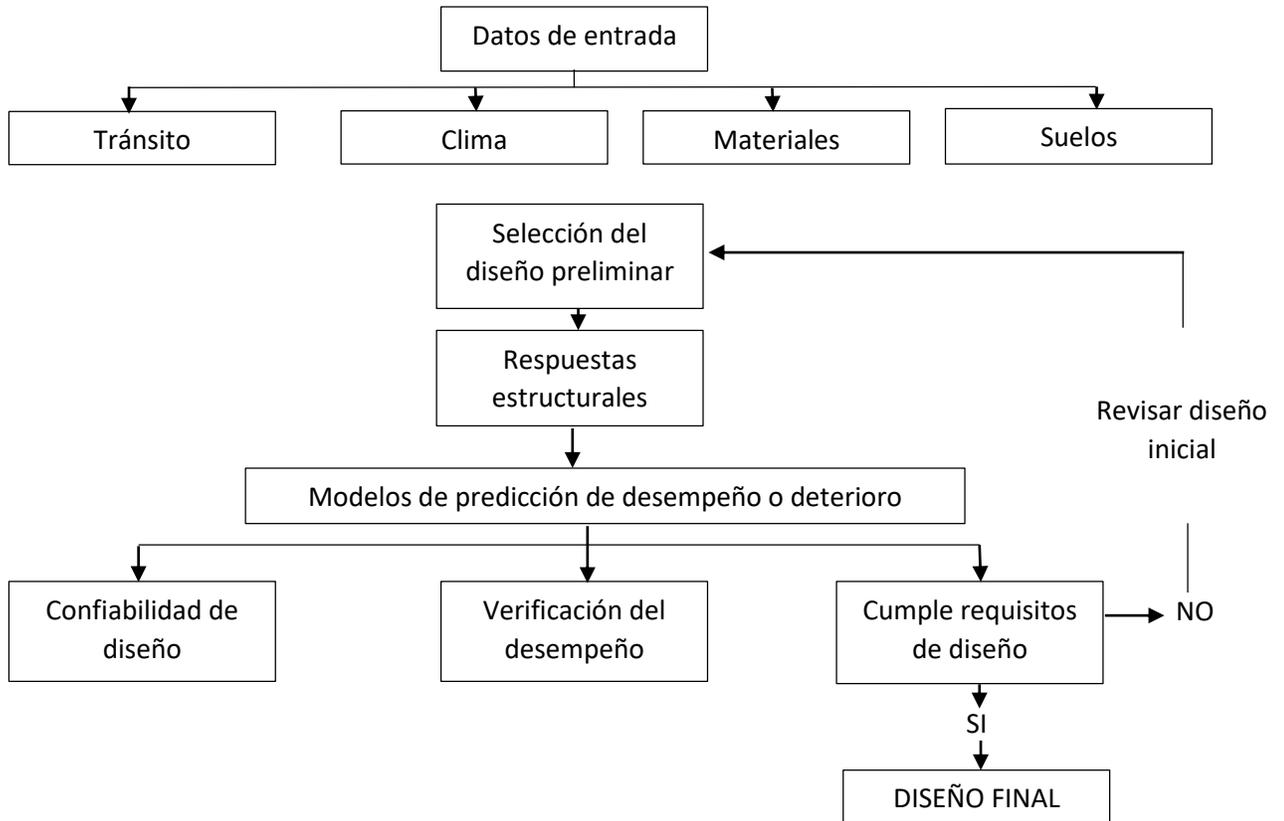


Figura 4.36 Flujograma asociado al método mecanicista empírico.

El método MEPDG se encarga de evaluar el comportamiento del pavimento y analizar el deterioro al que se expone, procurando que dichas variables que se determinaron con anterioridad contribuyan a generar la mejor condición adaptable a los parámetros iniciales de diseño, prolongando la vida del pavimento y cumpliendo con su respectivo periodo de diseño.

El método MEPDG propone modelos de predicción de desempeño (Fatiga y Erosión) a través de ecuaciones de predicción de deterioros para pavimentos rígidos y capas de concreto de cemento portland.

Es por ello que el método propone el análisis de las estructuras de pavimento a través de los danos ocasionados en la superficie debido a la fatiga y los ocasionados por erosión, los cuales se detallan a continuación:

Para los daños por fatiga se emplea el modelo de:

-Porcentaje de losas agrietadas: ocurre en el carril que contiene el tránsito más pesado. El agrietamiento puede producirse de abajo hacia arriba cuando los ejes de carga se encuentran cerca del borde longitudinal de la losa a una distancia media de las juntas transversales, produciendo un esfuerzo por flexión en la parte inferior de la losa y aumenta cuando el gradiente de temperatura es alto, es decir que la parte superior de la losa es más caliente que la inferior. Las aplicaciones repetitivas de estos ejes sobre la losa eventualmente generan daños por fatiga, generando una grieta transversal que se propaga hasta la superficie de la capa de rodadura.

En condiciones de servicio típicas se considera el agrietamiento transversal de abajo hacia arriba y de arriba hacia abajo. el porcentaje de losas con agrietamientos transversales que incluye todo tipo de severidad, se utiliza como medida del agrietamiento transversal y se emplea la siguiente fórmula:

$$CRK = \frac{1}{1 + (DI_f)^{-1.98}}$$

Donde:

CRK= Cantidad prevista de agrietamiento

DI_F= Daño por fatiga.

La expresión general para las acumulaciones de daños por fatiga es:

$$DI_F = \sum \frac{n_{i,j,k,l,m,n,o}}{N_{i,j,k,l,m,n,o}}$$

Donde:

DI_F= Daño total por fatiga

n_{i,j,k...}= Número de aplicaciones de carga en condición i,j,k,l,m,n

N_{i,j,k...}= Número admisible de aplicaciones de carga en condición i,j,k,l,m,n

i= Edad: explica el cambio en el módulo de rotura y elasticidad del PCC, fricción de contacto entre losa y base

j= Mes: explica el cambio en el módulo elástico de la capa de base y el módulo dinámico efectivo de reacción de la subrasante.

k = Tipo de eje: simple, tándem o trídem

l= Nivel de carga: Carga incremental para cada tipo de eje.

m= Diferencia de temperatura equivalente entre las superficies superior e inferior de la losa.

n= Desvío en la trayectoria del tránsito (distancia de la carga al borde del pavimento)

o= Fracción de tránsito de camiones por hora.

El número permitido de aplicaciones de carga se determina usando la ecuación de fatiga:

$$\log(N_{i,j,k,l,m,n}) = C_1 \left(\frac{MR_i}{\sigma_{i,j,k,l,m,n}} \right)^{C_2}$$

Donde:

$N_{i,j,k,l,m,n}$ = Número admisible de aplicaciones de carga en condición i,j,k,l,m,n

MR_i = Módulo de rotura del PCC a la edad i, en psi.

$\sigma_{i,j,k,l,m,n}$ = Esfuerzo aplicado en las condiciones i,j,k,l,m,n.

C_1 = Constante de calibración 2.0

C_2 = constante de calibración 1.22

El cálculo del daño por fatiga es la suma del daño de cada incremento y se determina el agrietamiento total combinado con la siguiente ecuación:

$$TCRACK = (CRK_{Bottom-up} + CRK_{Top-down} - CRK_{Bottom-up}CRK_{Top-down})100\%$$

Donde:

TCRACK= Agrietamiento transversal total, en porcentaje.

$CRK_{Bottom-up}$ = Cantidad prevista de grietas transversales de abajo hacia arriba.

$CRK_{Top-down}$ = Cantidad prevista de grietas transversales de arriba hacia abajo.

Para los daños por erosión se emplean los siguientes modelos:

-Escalonamiento de juntas: es la elevación diferencial a través de las juntas. el parámetro que solicita el método MEPDG es el promedio del escalonamiento de todas las juntas transversales en una sección de pavimento. Los escalonamientos transversales son el resultado de la aplicación de repetitivas cargas sobre la losa y a la vez, una transferencia deficiente de cargas a través de la junta, así como la humedad bajo la losa y la erosión de la base.

-Índice de rugosidad: representa la regularidad en el perfil longitudinal del pavimento. El parámetro que solicita el método MEPDG es el IRI obtenido a lo largo del perfil longitudinal de la carretera a partir de la media de los perfiles longitudinales en cada huella de la rueda.

$$EROSION = 100 \sum_i \frac{C_2 n_i}{N_i}$$

Donde:

EROSION= porcentaje de daño por erosión

n_i = Número esperado de cargas repetitivas.

N_i = Número admisible de repeticiones

C_2 = 0.06 para pavimentos sin hombro y 0.94 para pavimentos con hombro.

También el número admisible de aplicaciones de carga cuando el eje pasa por la esquina de la losa se detalla a continuación:

$$\log N = 14.524 - 6.777 * (C_1 * P - 9.0)^{0.103}$$

Donde:

N = Cargas repetitivas admisibles al final del periodo de diseño

P = Potencia (tasa de trabajo) de cada paso de eje en la esquina de la losa.

$$C_1 = 1 - (K_{static}/2000 * (4/h_{pcc}))^2$$

K_{static} = Modulo de reacción de la subbase psi/in

H_{pcc} = Espesor de la losa en pulgadas.

La potencia de cada paso del eje en la esquina de la losa se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$P = 268.7 * \frac{p^2}{K_{STATIC}^{0.73}}$$

Donde:

P = Potencia (tasa de trabajo) de cada paso de eje en la esquina de la losa.

p = Presión de la fundación en psi.

4.4.2.1 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE ME-CR RIGID

El software ME-CR Rigid permite el diseño bajo la metodología mecanicista-empírica de pavimentos rígidos. Su lenguaje de programación es JAVA. El software permite ingresar la información utilizando jerarquía de conceptos: en el primer nivel los usuarios ingresan los materiales específicos del proyecto, en el segundo nivel se requiere del uso de correlaciones para la obtención de propiedades y el tercer nivel para los valores típicos de los insumos de diseño, todo basado en los principios de la metodología mecanicista- empírica de diseño.

Los danos por erosión y fatiga se modelan en los datos de entrada del software, el cual exige la aplicación de cargas en los puntos críticos para cada parámetro incluyendo las propiedades y factores característicos de erosión y fatiga, obteniendo la acumulación de danos por tiempo de cada uno de los parámetros analizados.

La pantalla principal presenta las siguientes pestañas relacionadas con entradas y salidas de las variables del software:

- a) Información general
- b) Variables de desempeño
- c) Respuestas del pavimento
- d) Tráfico
- e) Clima

- f) Propiedades de la subrasante
- g) Propiedades del concreto
- h) Configuración del pavimento
- i) Cálculo y resultados

INTERFAZ DEL SOFTWARE

Figura 4.37 Interfaz de usuario ME-CR Rigid 1.0

Información General

Se ingresa información básica del pavimento a diseñar: vida útil de análisis, mes de apertura, tipo de pavimento rígido y clasificación (importancia) de la vía.

La clasificación de la carretera se utiliza para los valores límites recomendados de los deterioros. Si el usuario escogió para algún deterioro la opción de valor

límite típico, pero no eligió la clasificación de vía, al momento de calcular, no se podrá realizar la acción y recibirá un mensaje acerca de ello.

Variables de desempeño

Esta pestaña trata de los tipos de deterioro que serán considerados en el diseño. Se puede diseñar para agrietamiento transversal y falla de junta en pavimento tipo JPCP, y huecos para pavimento tipo CRCP.

Por medio de Botones de Opciones (Radio Button en el lenguaje Java), el usuario puede elegir para cual deterioro quiere realizar el análisis. Al elegirlo se despliega para cada deterioro, las opciones de valores límite, confiabilidad y modelo de deterioro a analiza.



Figura 4.38 Interfaz del deterioro a analizar

En cuanto al modelo de deterioro, el usuario debe elegir cuál función de transferencia quiere utilizar para el cálculo de daño y deterioro en el pavimento. Se presenta una imagen del modelo típico de la guía MEPDG y el usuario puede escoger entre ingresar él mismo las constantes del modelo o utilizar las constantes recomendadas por la guía MEPDG.

Respuestas del pavimento

Esta pestaña se trata la obtención de esfuerzos y deflexiones en el pavimento. El usuario debe escoger la forma de obtener las siguientes respuestas:

- Esfuerzo máximo en la superficie de la losa
- Esfuerzo máximo en la base de la losa
- Deflexión diferencial máxima entre losas
- Deflexión en esquina por alabeo

La alternativa de ingreso directo presenta las posibilidades de: valor único, valor horario, valor diario, valor mensual, valor semestral y valor anual

Figura 4.39 Interfaz de respuestas del pavimento

Tráfico

La herramienta utiliza el enfoque de espectros de carga. Permite el ingreso de hasta 10 vehículos de análisis, esto por medio de un botón de opciones. Para cada vehículo, el usuario debe ingresar nombre, porcentaje respecto al TPDA, cantidad de ejes simples, tándem y trídem, y la elección de un vehículo similar

Para cada vehículo, el usuario debe obtener valores de factor de distribución horaria y mensual. Esto puede hacerlo de manera directa en una tabla, utilizando valores usuales según una ubicación elegida o valores usuales según la guía MEPDG.

Posterior a esto, por medio de una tabla el usuario ingresa el espectro de carga de vehículo para ejes tipo simple, tándem y trídem. La tabla se actualiza si el vehículo presenta porcentaje respecto al TPDA y cantidad de ejes en cada tipo.

Por último, el usuario debe ingresar el factor de distribución de dirección y de carril. Además, debe ingresar un valor de TPDA para los años de diseño. Esto se puede hacer por medio de un valor al primer año y una tasa de crecimiento ya sea lineal o compuesto; o pueden ser ingresados de manera manual para cada año de diseño por medio de una tabla.

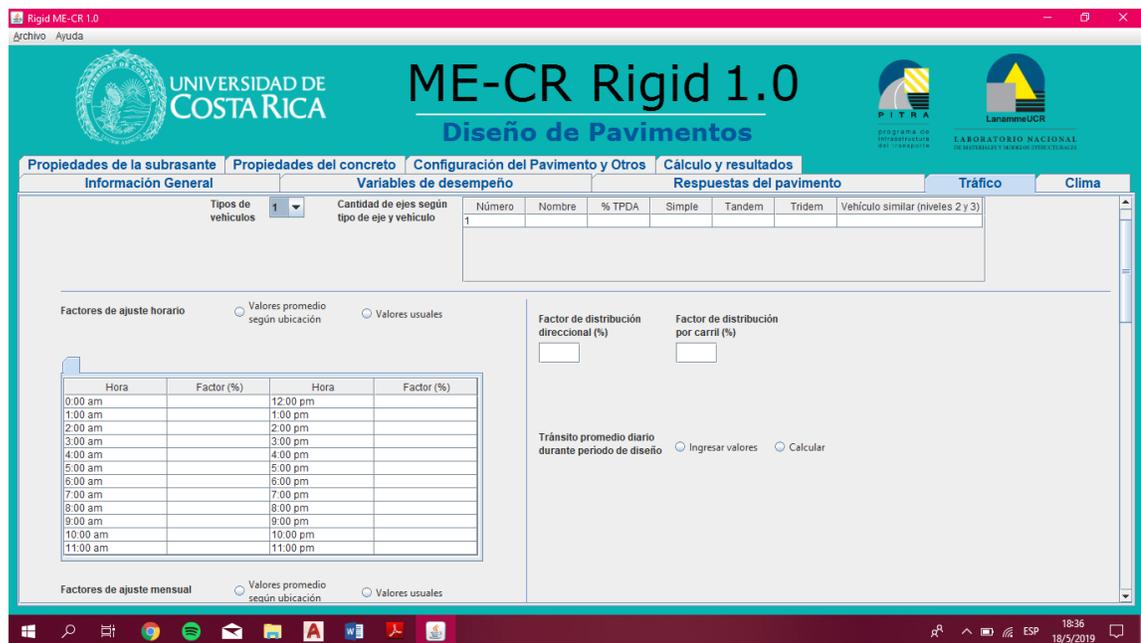


Figura 4.40 Interfaz de tráfico en software ME-CR Rigid.

Clima

Debido a que no existe en el país mucha información de clima enfocada para pavimentos rígidos, esta sección de la herramienta se presenta bastante escueta.

Se requiere el diferencial de temperatura entre la superficie y base de la losa.

El usuario puede ingresarlo de manera única, horaria, diaria, mensual, semestral o anual; de manera idéntica al ingreso de respuestas del pavimento ya explicado

Se debe ingresar también el número promedio anual de días húmedos, es decir, precipitación mayor a 2,54 mm; y el índice de congelamiento de la base, es decir, porcentaje del tiempo con temperaturas menores a la congelación. Estos valores son requeridos para el deterioro de falla de junta calibrado en la guía MEPDG.

The screenshot shows the 'ME-CR Rigid 1.0' software interface. The title bar indicates 'Rigid ME-CR 1.0' and 'Archivo Ayuda'. The main header features the logos of the 'UNIVERSIDAD DE COSTA RICA', 'PIYRA', and 'LanámmeUCR LABORATORIO NACIONAL DE INGENIERÍA Y REPARACIÓN DE PAVIMENTOS'. The interface is divided into several tabs: 'Propiedades de la subrasante', 'Propiedades del concreto', 'Configuración del Pavimento y Otros', and 'Cálculo y resultados'. The 'Cálculo y resultados' tab is active, showing sub-tabs for 'Información General', 'Variables de desempeño', 'Respuestas del pavimento', 'Tráfico', and 'Clima'. The 'Clima' sub-tab is selected, displaying a form for 'Factor de clima (unidad)'. The form includes a label 'Diferencial térmico entre la superficie y base de la losa (°C o F)' and a list of radio button options: 'Valor Único', 'Siddique, Hossain, & Meggers (2004)', 'Valor Horario', 'Valor Diario', 'Valor Mensual', and 'Valor Semestral'.

Figura 4.41 Insertar datos referidos al clima.

Propiedades de subrasante

Muestra la sección de propiedades de la capa subrasante de soporte. La principal propiedad a ingresar en este caso es la de módulo de reacción de subrasante. Otra forma de obtener estos datos es usando las correlaciones de AASHTO 93 con el módulo resiliente o de la PCA con el CBR. En cuanto a la opción de AASHTO 93, el usuario debe elegir si se trata de losa directa sobre subrasante o si es una losa y subbase. Para esta última, el usuario debe elegir también si se presenta una subrasante infinita o una roca maciza a cierta profundidad que se ingresa en otra pestaña. Para el caso de correlaciones de PCA con CBR, el usuario elige si se presenta o no capa de base. Por último, el usuario elige tipo de subbase para tomar en cuenta la pérdida de soporte.

The screenshot displays the 'ME-CR Rigid 1.0' software interface. The main window title is 'Rigid ME-CR 1.0'. The header features the Universidad de Costa Rica logo and the text 'ME-CR Rigid 1.0 Diseño de Pavimentos'. Below the header are several tabs: 'Propiedades de la subrasante', 'Propiedades del concreto', 'Configuración del Pavimento y Otros', 'Cálculo y resultados', 'Tráfico', and 'Clima'. The 'Propiedades de la subrasante' tab is selected, showing a form with the following sections:

- Propiedad de la subrasante (unidad):** A dropdown menu.
- Ingresar Valor:** A section with a question mark icon.
- Usar correlación:** Radio buttons for 'AASHTO 1993' and 'PCA 1984'.
- Usar valores típicos:** Radio button for 'Valor usual según calidad (AASHTO 1993)'.
- Módulo de reacción (MPa/m):** Radio buttons for 'Valor Único', 'Valor Mensual', 'Valor Semestral', and 'Valor Anual'.
- Sobrecarga en la subrasante (kg):** An input field.
- Porcentaje de subrasante pasando malla #200 (%):** An input field.

Figura 4.42 Ingreso de datos para las propiedades de la subrasante

Propiedades del concreto

Se refiere a las características del concreto a utilizar. Se requiere el módulo de ruptura y el módulo elástico del concreto. Para el módulo de ruptura, se puede ingresar un valor único de análisis o las constantes de un modelo cuadrático de ganancia de resistencia junto con el valor del módulo a los 28 días.

The screenshot shows the 'Propiedades del concreto' (Concrete Properties) tab in the ME-CR Rigid 1.0 software. The interface is divided into several sections for configuring concrete properties:

- Módulo de ruptura MR (MPa):**
 - Options: Valor Único, MEDPG, Cárdenas, 2004.
 - Modelo de ganancia de resistencia: Valor Único, Modelo de ganancia de resistencia.
 - Usar el siguiente modelo de ganancia de resistencia de la MEPDG:

$$MR_{f_{actio}} = 1 + 0,12 * \log_{10} \left(\frac{Edad}{0,0767} \right) - 0,01566 * \left[\log_{10} \left(\frac{Edad}{0,0767} \right) \right]^2$$
 - Ingresando (escoger): MR a 28 días, f'c a 28 días (escoger correlación).
- Módulo de elasticidad E (GPa):**
 - Options: Valor Único, Valor único.
 - Modelo de ganancia de resistencia: Valor Único, Modelo de ganancia de resistencia.
 - Usar el siguiente modelo de ganancia de resistencia de la MEPDG:

$$MR_{f_{actio}} = 1 + 0,12 * \log_{10} \left(\frac{Edad}{0,0767} \right) - 0,01566 * \left[\log_{10} \left(\frac{Edad}{0,0767} \right) \right]^2$$
 - Ingresando (escoger): MR a 28 días, f'c a 28 días, E a 28 días.

Figura 4.43 Interfaz para las propiedades del concreto

Configuración del pavimento y otros

Pestaña relacionada con las dimensiones geométricas y características estructurales del pavimento a evaluar (diseñar).

Longitud de losa

- Espesor de losa

- Diámetro de dovelas
- Separación entre dovelas
- Transferencia de carga LTE
- Espesor de subbase
- Módulo de elasticidad de subbase
- Factor de erodabilidad de subbase/base (subrasante/base)
- Radio de contacto de carga

Su requerimiento depende de los deterioros elegidos, el modelo para cada deterioro, la forma de obtención de respuestas del pavimento, entre otros.

The screenshot shows the 'ME-CR Rigid 1.0' software interface. The title bar indicates 'Rigid ME-CR 1.0' and 'Archivo Ayuda'. The main header features the 'UNIVERSIDAD DE COSTA RICA' logo, the title 'ME-CR Rigid 1.0 Diseño de Pavimentos', and logos for 'PITRA' (Programa de Investigación del Transporte) and 'LanammeUCR' (Laboratorio Nacional de Materiales y Mecánica de Suelos). Below the header is a navigation menu with tabs: 'Propiedades de la subrasante', 'Propiedades del concreto', 'Configuración del Pavimento y Otros', and 'Cálculo y resultados'. The 'Configuración del Pavimento y Otros' tab is active, showing a sub-menu with 'Información General', 'Variables de desempeño', 'Respuestas del pavimento', 'Tráfico', and 'Clima'. The 'Información General' sub-menu is selected, displaying a list of input fields for pavement configuration:

Propiedades de la subrasante	Propiedades del concreto	Configuración del Pavimento y Otros	Cálculo y resultados
Información General			
Variables de desempeño			
Respuestas del pavimento			
Tráfico			
Clima			
Longitud de losas (m)	<input type="text"/>		
Espesor de losas (cm)	<input type="text"/>		
Presencia de dovelas de transferencia de carga	<input type="checkbox"/>		
Diámetro de dovelas (cm)	<input type="text"/>		
Transferencia de carga (%)	<input type="text"/>		
Espesor subbase (cm)	<input type="text"/>		
Módulo elástico subbase (Pa)	<input type="text"/>		
Factor de erodabilidad base/subbase	<input type="text"/>		
Profundidad a la capa rígida (cm)	<input type="text"/>		
Radio de contacto de carga (cm)	<input type="text"/>		

Figura 4.44 Interfaz de configuración del pavimento y otros

Cálculo y resultados

Esta pestaña presenta un botón Calcular para análisis del diseño de pavimento propuesto. Al momento del usuario oprimir el botón, la herramienta analiza y verifica que todos los datos necesarios hayan sido ingresados.

El software ME-CR Rigid presenta la ventaja que al proceder al cálculo analiza y verifica que el usuario haya ingresado los datos necesarios y si se presenta un error, se indica su naturaleza y donde se debe solventar, por ejemplo, al no haber ingresado los datos correctamente o dejar espacios vacíos. Posteriormente a la verificación, el cálculo puede tomar unos minutos dependiendo de los datos ingresados.

El proceso que realiza ME-CR Rigid es iterativo hasta lograr el desempeño aceptable del pavimento en términos del deterioro acumulado al finalizar la vida útil. El programa permite la modificación de las propiedades geométricas, estructurales del pavimento y de las propiedades de los materiales, realizando una evaluación de los diseños ingresados hasta obtener uno que cumpla con resultados satisfactorios.

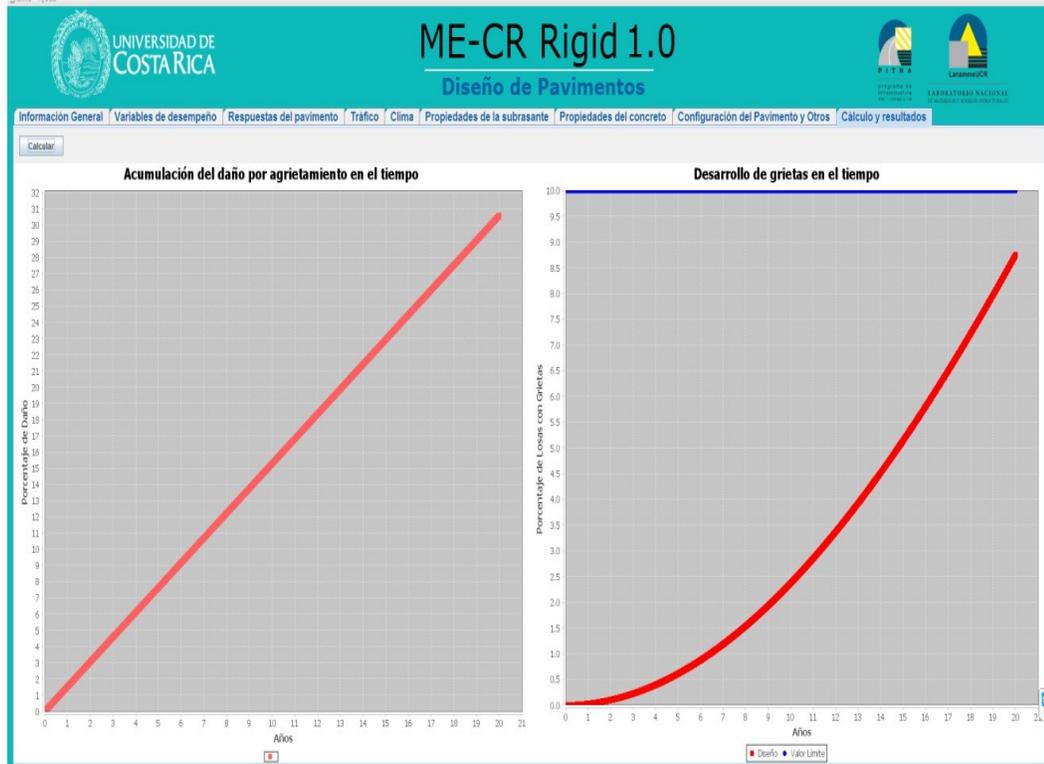


Figura 4.45 Interfaz de salida de datos ME-CR Rigid.

CAPÍTULO V

CAPÍTULO V: MODELOS PCA Y MEPDG

5.1 DESCRIPCIÓN DE LOS TRAMOS DE ESTUDIO

A partir de las gestiones realizadas a través de la Unidad de Acceso a la Información Pública del Ministerio de Obras Públicas, se obtuvieron los siguientes informes de diseño de pavimentos de concreto hidráulico diseñados bajo AASHTO 93, los cuales serán analizados por modelos de erosión y fatiga. La metodología y criterios de diseño incluyen variables como la clasificación de la vía, el volumen del tráfico, el periodo de diseño, las propiedades de los materiales y el espesor del pavimento.

Por consiguiente, se detallan las características de cada tramo en estudio:

1- PROLONGACIÓN BOULEVARD ORDEN DE MALTA Y AMPLIACIÓN CALLE HUIZÚCAR (TRAMO II)

El periodo de análisis de dicho diseño es de 25 años para la estructura del pavimento. El espesor de la subbase de suelo cemento es de 25 cm y la capa de rodadura de concreto hidráulico de 23 cm. Conectando desde El paso del Jaguar hasta Calle a Huizúcar, así como se muestra a continuación:

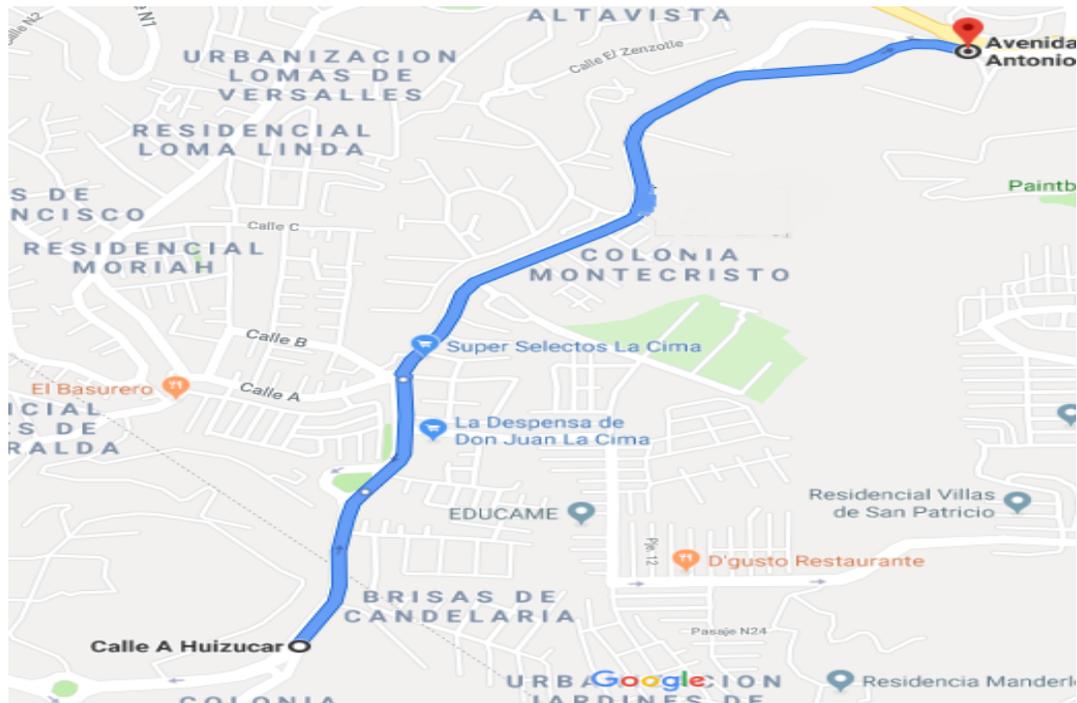


Figura 5.1 Esquema de ubicación de la prolongación Boulevard Orden de Malta, con 2.9 km

La tasa de crecimiento anual proyectada para este tramo varía entre 1.06 y 1.16% promedio. El año de apertura de dicha vía se realizó en el 2005. Su configuración geométrica presenta 2 carriles por sentido sin hombro, barras de transmisión entre losas y configuración de dovelas en el sentido longitudinal.

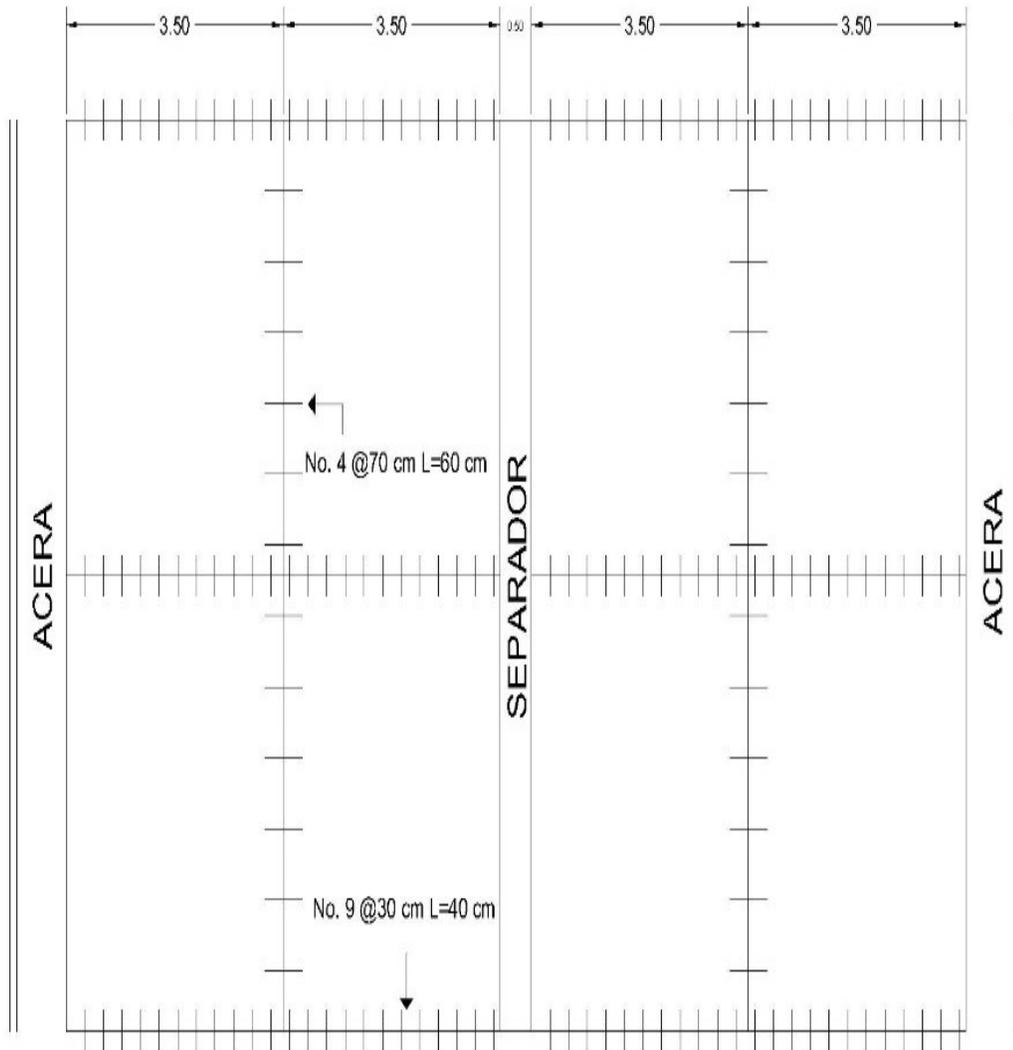


Figura 5.2 Detalle transversal y en planta de la estructura del pavimento Boulevard
Orden de Malta.

Se presenta la tabla resumen de variables de entrada para ser ingresados en los software para su análisis, detallado en sus respectivos informes de diseño de pavimento, los cuales se presentan a continuación:

PROLONGACIÓN BOULEVARD ORDEN DE MALTA Y AMPLIACIÓN CALLE A HUIZÚCAR TRAMO II			
<i>Componente</i>	<i>Variable</i>	<i>Dato</i>	<i>Unidad</i>
Losa	Ancho de losa	3.5	m
	Largo de losa	4.5	m
	Espesor de losa	23.0	cm
	Espesor de subbase	25	cm
	periodo de análisis	25	años
	E	29764.8	Mpa
	Coefficiente de Poisson	0.15	
	Coefficiente térmico	1.08E-05	°C
	Densidad	2400	kg/m3
Dovelas y barras de amarre	E	200000	Mpa
	Coefficiente de Poisson	0.3	
Base	E	4134.0	Mpa
	Coefficiente de Poisson	0.15	
	Densidad	1802.08	kg/m3
Densidad líquida de la subbase	k	0.49417	Mpa/mm
Dovelas	Embebidas	200	mm
	Diámetro	28.57	mm
	Cantidad	11	
Barras de amarre	Embebidas	300	mm
	Diámetro	12.7	mm
	Espaciamiento	12.7	mm
	Abertura entre losas	6	mm

Tabla 5.1 Parámetros de diseño de la estructura del pavimento Boulevard Orden de Malta.

La configuración geométrica de este tramo la conforman 3 carriles y un hombro por sentido, con losas de 4.50 de largo por 3.65 de ancho. Cuenta con distribución longitudinal de dovelas y distribución transversal de barras de amarre para garantizar la transmisión de cargas entre losas adyacentes.

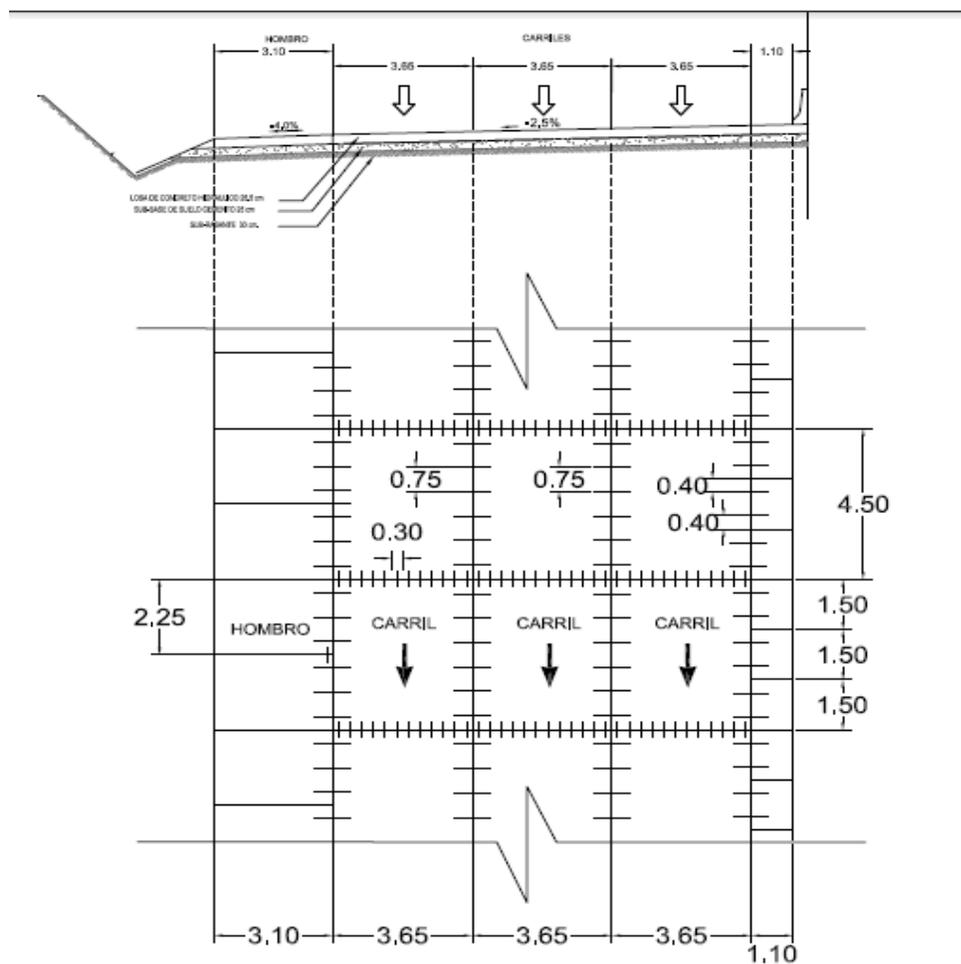


Figura 5.4 Detalle típico: Modulación de losas en tramos rectos.

Por consiguiente, se presenta la tabla resumen de variables de entrada para ser ingresados en los software para su análisis:

BOULEVARD MONSEÑOR ROMERO TRAMO I			
<i>Componente</i>	<i>Variable</i>	<i>Dato</i>	<i>Unidad</i>
losa	Ancho de losa	3.65	m
	Largo de losa	4.5	m
	Espesor de losa	25.5	cm
	Espesor de subbase	25	cm
	periodo de análisis	25	años
	E	29785.35	Mpa
	Coefficiente de Poisson	0.15	
	Coefficiente térmico	1.08E-05	°C
	Densidad	2400	kg/m3
Dovelas y barras de amarre	E	200000	Mpa
	Coefficiente de Poisson	0.3	
Base	E	482633	Mpa
	Coefficiente de Poisson	0.15	
	Densidad	1802.08	kg/m3
Densidad liquida de la subbase	k	0.49	Mpa/mm
Dovelas	Embebidas	230	mm
	Diámetro	30	mm
	Cantidad	11	
Barras de amarre	Embebidas	460	mm
	Diámetro	12.7	mm
	Espaciamiento	750	mm
	Abertura entre losas	6	mm

Tabla 5.2 Parámetros de diseño de la estructura del pavimento Boulevard Monseñor Romero tramo I.

3- PROYECTO APERTURA CONEXIONES NEJAPA – APOPA – TRONCAL DEL NORTE Y BOULEVARD CONSTITUCIÓN TRAMO 2.

El paquete estructural está conformado por una losa de concreto hidráulico de 21.5 cm de espesor y una base de suelo estabilizado con cemento Portland de 20 cm. La apertura del tramo II interconexión se llevó a cabo en el año 2003 y su periodo de diseño consta de 25 años y así como se muestra en el siguiente esquema el tramo II se desarrolla entre la intersección con la carretera Troncal del Norte y el redondel Integración.



Figura 5.5 Ubicación del tramo II Interconexión.

Este tramo está conformado por 2 carriles de dimensiones de ancho 2.50 m y largo 3.70 y 4.50 m, así como un hombro por sentido con su respectivo refuerzo en forma de dovelas en el sentido longitudinal y barras de amarre en el sentido transversal, tal como se muestra a continuación:

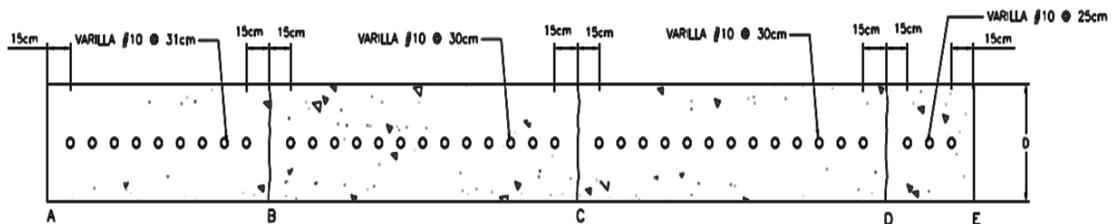


Figura 5.6 Sección típica de distribución de barras de transferencia de carga.

A continuación, se presenta la tabla resumen de variables de entrada al Software, para el análisis del tramo II de Interconexión.

INTERCONEXIÓN TRAMO II			
<i>Componente</i>	<i>Variable</i>	<i>Dato</i>	<i>Unidad</i>
Losa	Ancho de losa	3.70-3.50	m
	Largo de losa	4.5-4.00	m
	Espesor de losa	21.5	cm
	Espesor de subbase	20	cm
	periodo de análisis	25	años
	E	24838.43	Mpa
	Coefficiente de Poisson	0.15	
	Coefficiente térmico	1.0802e-005	°C
	Densidad	2400	kg/m3
Dovelas y barras de amarre	E	200000	Mpa
	Coefficiente de Poisson	0.3	
Base	E	4065.1	Mpa
	Coefficiente de Poisson	0.15	
	Densidad	0	kg/m3
Densidad líquida de la subbase	k	0.40813	Mpa/mm
Dovelas	Embebidas	225	mm
	Diámetro	25.4	mm
	Cantidad	11	
Barras de amarre	Embebidas	400	mm
	Diámetro	12.7	mm
	Espaciamiento	900	mm
	Abertura entre losas	6	mm

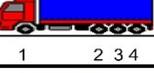
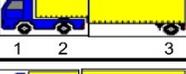
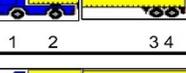
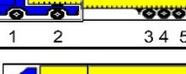
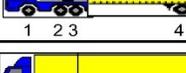
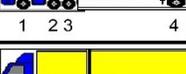
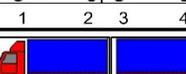
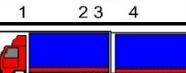
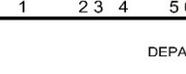
Tabla 5.3 Parámetros de diseño de la estructura del pavimento Interconexión tramo II.

5.2 DETERMINACIÓN DE LOS ESFUERZOS EN LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO.

Se realizarán cálculos de esfuerzos y deformaciones presentes en la estructura de los pavimentos en estudio. Anteriormente fueron presentados los datos generales de cada tramo, los cuales son necesarios para poder realizar el cálculo de esfuerzos sobre la estructura de pavimento. Sin embargo, cabe resaltar que las variables que provocan dichos esfuerzos son el tipo de carga y la temperatura.

Considerando que la metodología utilizada se basa en el criterio de serviciabilidad y que toma en cuenta cuatro tipos de ejes (simple, dual, tándem y trídem), para los cuales su peso está establecido por el departamento de básculas, peso y dimensiones, como se muestra a continuación:

PESO MAXIMO PERMISIBLE POR TIPO DE VEHICULOS

TIPO DE VEH.	ESQUEMA DEL VEHICULO	PESO MAXIMO AUTORIZADO						PESO TOTAL EN TON. Mts.	DIMENSIONES MAXIMAS EN METROS		
		1er EJE	2do EJE	3er EJE	4to EJE	5to EJE	6to EJE		LARGO	ANCHO	ALTO
1 C-2A		ENTRE 1.5 4	ENTRE 2.5 6					4.0 A 10.0	7.0	2.6	4.15
2 C-2	 1 2	5.00	10.00					15.00	12.0	2.6	4.15
3 C-3	 1 2 3	5.00	16.50 8.25	8.25				21.50	12.0	2.6	4.15
4 C-4	 1 2 3 4	5.00		20.00 6.67	6.66	6.66		25.00	16.75	2.6	4.15
5 T2-S1	 1 2 3	5.00	9.00	9.00				23.00	16.75	2.6	4.15
6 T2-S2	 1 2 3 4	5.00	9.00	16.00 8.00	8.00			30.00	17.5	2.6	4.15
7 T2-S3	 1 2 3 4 5	5.00	9.00		20.00 6.67	6.67	6.66	34.00	17.5	2.6	4.15
8 T3-S1	 1 2 3 4	5.00	16.00 8.00	8.00	9.00			30.00	20.3	2.6	4.15
9 T3-S2	 1 2 3 4 5	5.00	16.00 8.00	8.00	16.00 8.00	8.00		37.00	20.3	2.6	4.15
10 T3-S3	 1 2 3 4 5 6	5.00	16.00 8.00	8.00	20.00 6.67	6.67	6.66	41.00	20.3	2.6	4.15
11 C2-R2	 1 2 3 4	5.00 5.00 5.00	10.00 10.00 10.00	4.5a 4.5a 7.0a	4.5a 7.0b 7.0b			24.00 26.50 29.00	18.3	2.6	4.15
12 C3-R2	 1 2 3 4 5	5.00 5.00 5.00	16.50 8.25	8.25	4.5a 4.5a 7.0b	4.5a 7.0b 7.00		30.50 33.00 35.50	18.3	2.6	4.15
13 C3-R3	 1 2 3 4 5 6	5.00 5.00	16.50 8.25	8.25	4.0a 6.5b	13.00 6.50	6.50	38.50 41.00	18.3	2.6	4.15

DEPARTAMENTO DE BÁSCULAS, PESO Y DIMENSIONES.-MOPTVDU

Figura 5.7 Pesos máximos permisibles. Viceministerio de Transporte.

Además, la temperatura juega un papel muy importante a la hora de calcular esfuerzos en estructuras de pavimentos. Sin embargo, en los diseños realizados bajo AASHTO 93, dicho parámetro no es considerado.

La investigación realizada por la fundación ISCYC, desarrolló un estudio práctico para determinar el gradiente térmico en las estructuras de pavimento de concreto hidráulico, obteniendo resultados para distintos espesores de losa. El estudio lleva por nombre “INVESTIGACIÓN DE GRADIENTE TÉRMICO EN PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO”, y fue realizado en Carretera Panamericana, tramo comprendido entre Avenida la Revolución – Las Delicias.

El estudio consistió en instalar sensores de manera simultánea a la colocación del concreto tanto en la superficie, al medio y al fondo de la losa, con el objetivo de determinar la temperatura a cierto intervalo de tiempo a través de la lectura de los sensores, teniendo la particularidad que fueron colocados en ubicaciones definidas a lo largo del tramo.

Con los valores registrados por los sensores se calcularon los cambios de temperatura entre la base y la superficie de la losa, dando como resultado un valor promedio y un valor máximo. Además, el tramo contenía tres espesores de losas diferentes por lo que los datos antes mencionados fueron calculados para cada uno de ellos.

A continuación, se presenta una tabla resumen de los valores de diferenciales térmicos obtenidos con este estudio:

ESPEJOR DE LOSA	25 cm	23 cm	20 cm
PROMEDIO $+\Delta t$ °C	9.95	9.71	11.9
PROMEDIO $-\Delta t$ °C	-5.25	-4.99	-6.38
MAXIMO $+\Delta t$ °C	16	14.5	19.5
MAXIMO $-\Delta t$ °C	-8	-7.5	-9.5

Tabla 5.4 *Diferenciales térmicos*. Revista ISCYC, tomo 73.

De la tabla anterior es importante mencionar que los valores positivos se presentan en la condición diurna y los valores negativos en la condición nocturna.

Con las consideraciones antes mencionadas se procede a realizar cálculos de esfuerzos para los tramos en estudio.

5.2.1 ESFUERZOS CALCULADOS POR MEDIO DEL SOFTWARE EVERFE

2.25.

Para los tramos en estudio se han utilizado los mismos tipos de ejes en las mismas posiciones (centro, esquina y borde). Sin embargo, cada tramo en estudio tiene características físicas diferentes.

BOULEVARD MONSEÑOR ROMERO SANTA TECLA, TRAMO I.

Este tramo está conformado físicamente por tres carriles y un hombro (por sentido). Debido a las limitantes del software no es posible modelar el hombro.

Sin embargo, los resultados a obtener son considerados aceptables.

A continuación, se presentan las diferentes posiciones de carga que se han considerado en el análisis y la configuración geométrica de las losas:

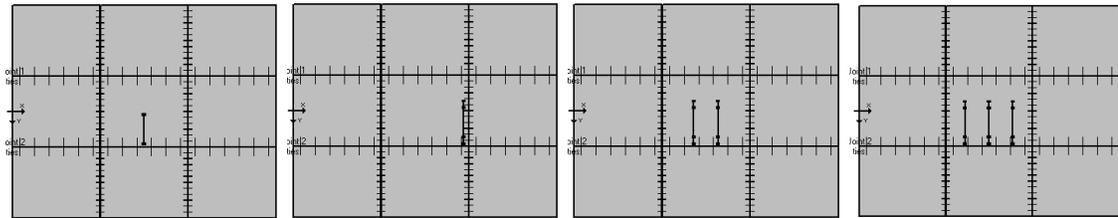


Figura 5.8 Configuración de localización de ejes en el Borde.

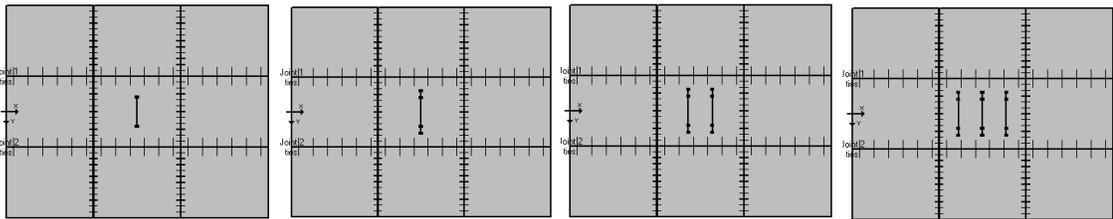


Figura 5.9 Configuración de localización de ejes en el Centro.

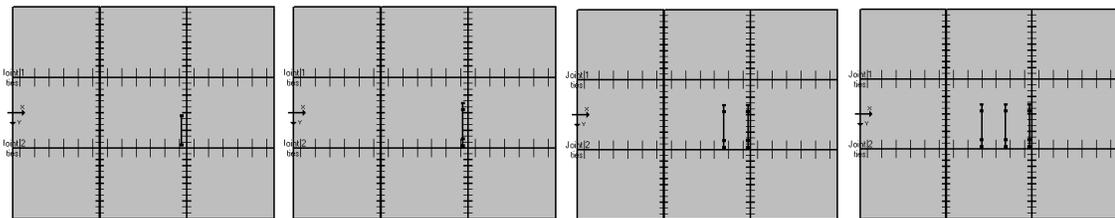


Figura 5.10 Configuración de localización de ejes en la Esquina.

Se presenta un ejemplo del cálculo de esfuerzos en EverFe para la condición de carga (eje simple), ubicada al centro y condición diurna de temperatura.

Geometría: En esta pestaña se ingresaron las dimensiones de la estructura del pavimento como se muestra a continuación:

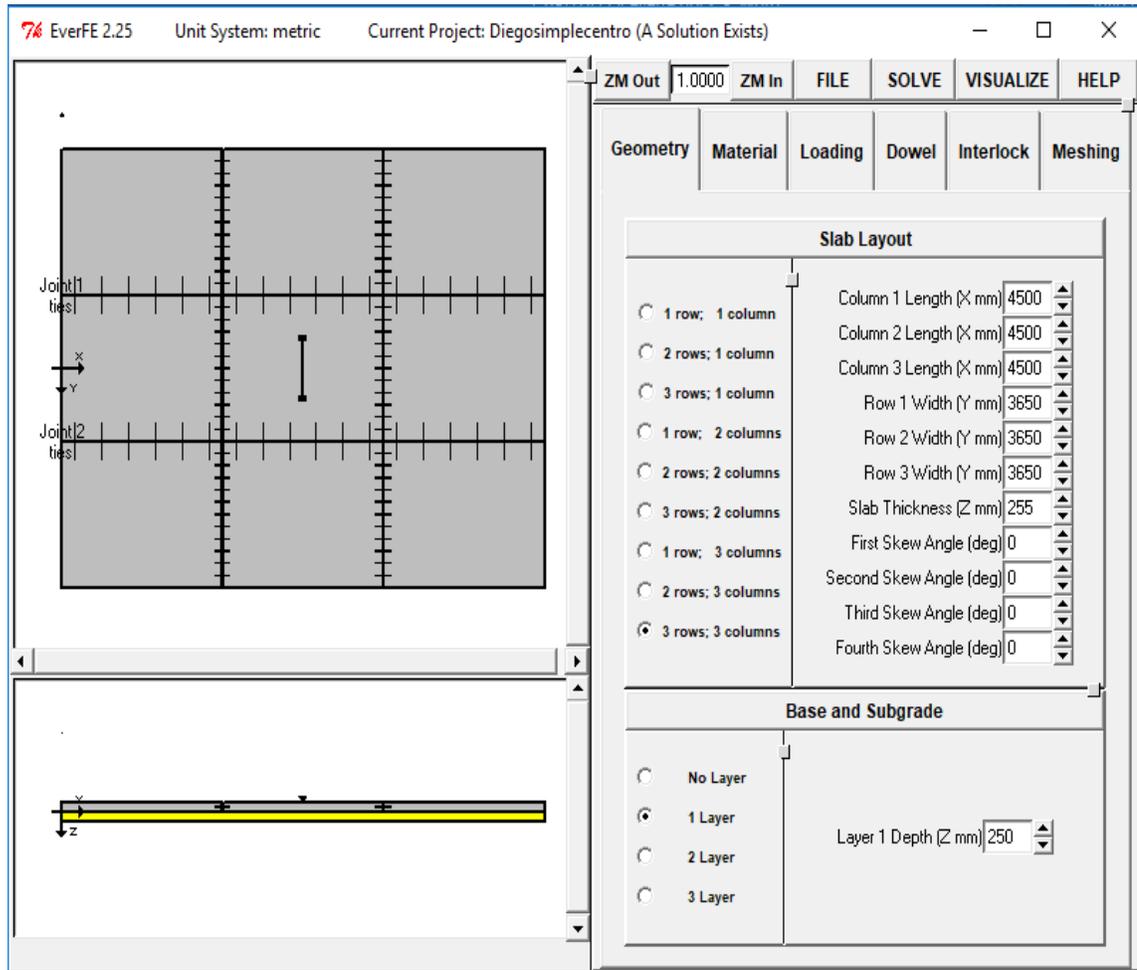


Figura 5.11 Ingreso de datos en pestaña geometría.

Material: En esta pestaña se definieron las propiedades de la losa, subbase y el acero que contiene la estructura, estos valores fueron mostrados en la descripción del tramo en estudio.

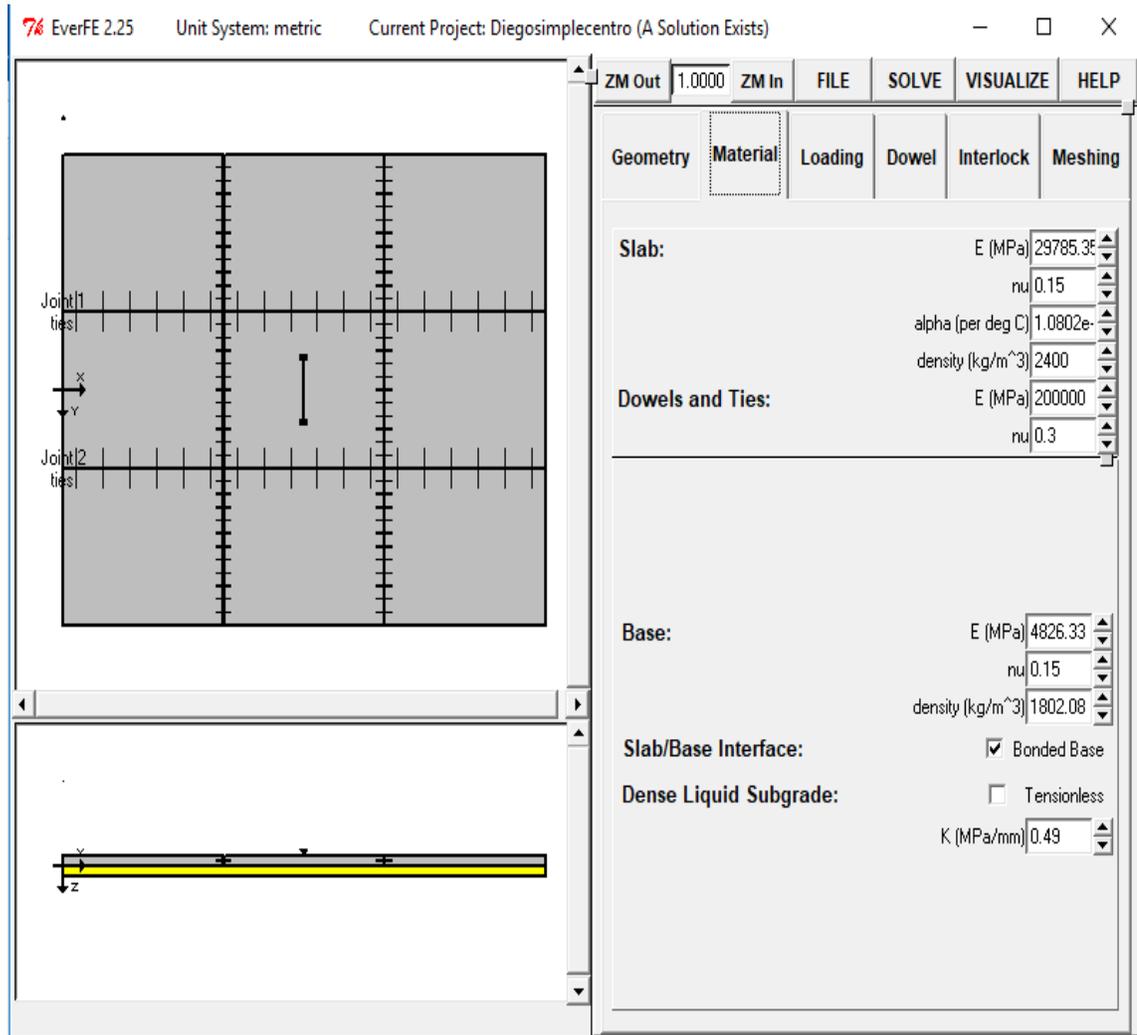


Figura 5.12 Ingreso de datos en pestaña materiales.

Carga: En esta pestaña se ingresó el tipo de eje y la posición de este, además del diferencial térmico máximo para la condición diurna.

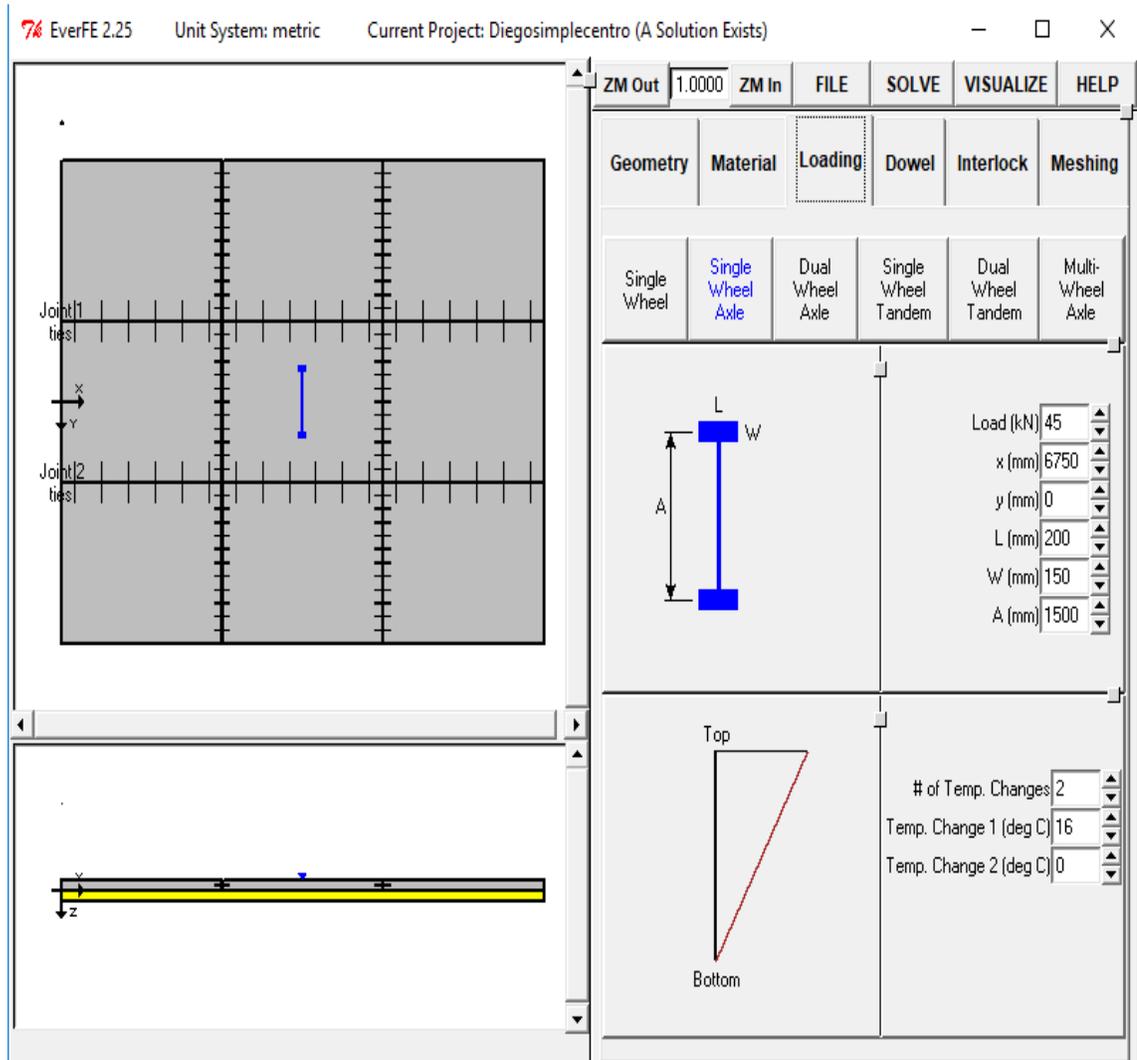


Figura 5.13 Ingreso de datos en pestaña cargas.

Dovelas: En dicha pestaña se definen las características físicas de las dovelas y barras de amarre, a continuación, se muestra la distribución de ellas:

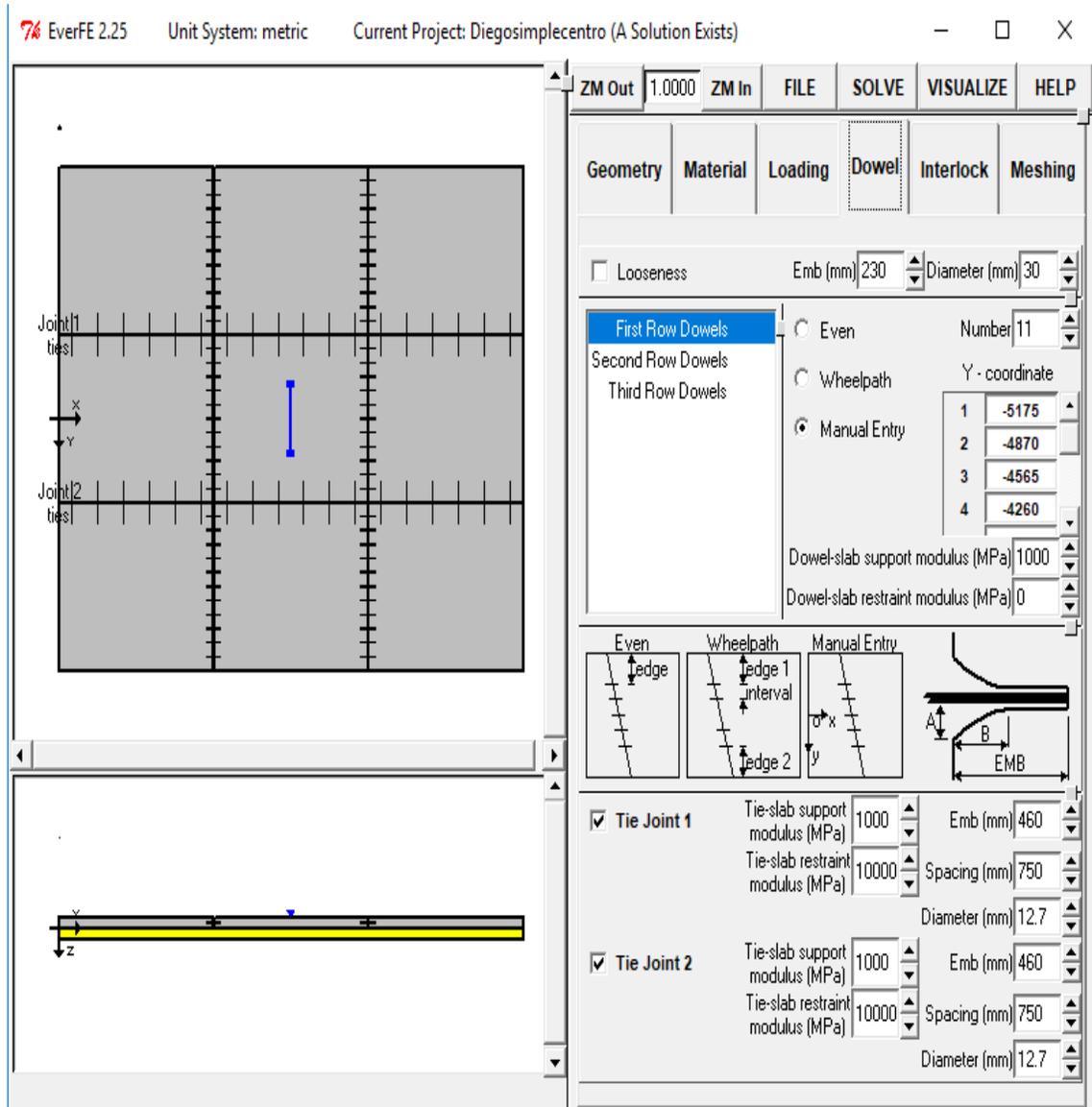


Figura 5.14 Ingreso de datos en pestaña dovela.

Interlock: En esta pestaña se escoge el tipo de modelo a utilizar y además se establecen las aberturas de las juntas longitudinales y transversales.

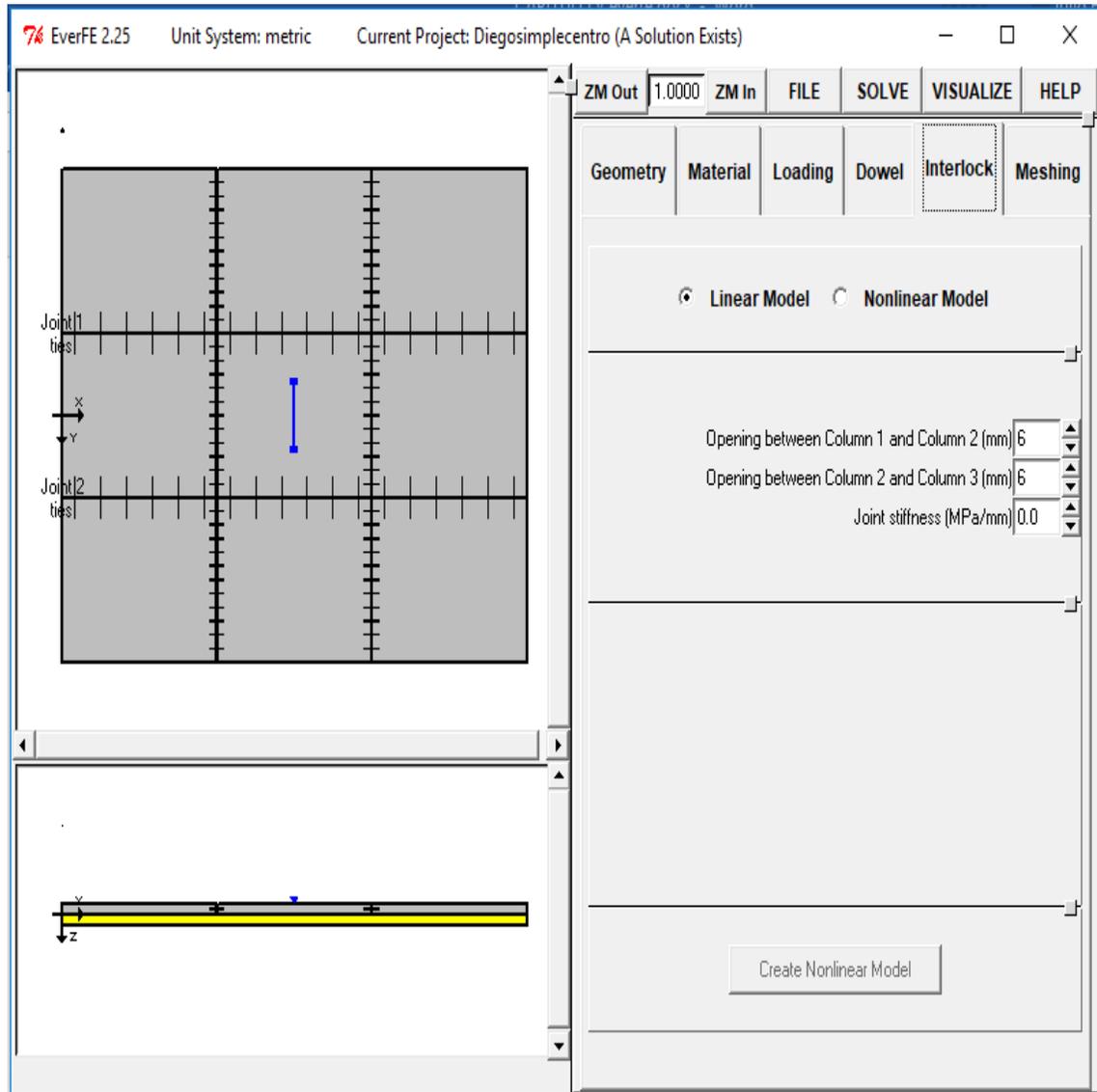


Figura 5.15 Ingreso de datos en pestaña Interlock.

Mallado: En esta pestaña se definen tantas intersecciones como se requiera el detalle del análisis. Es decir, entre más intersecciones se tengan mayor es el grado de precisión del análisis.

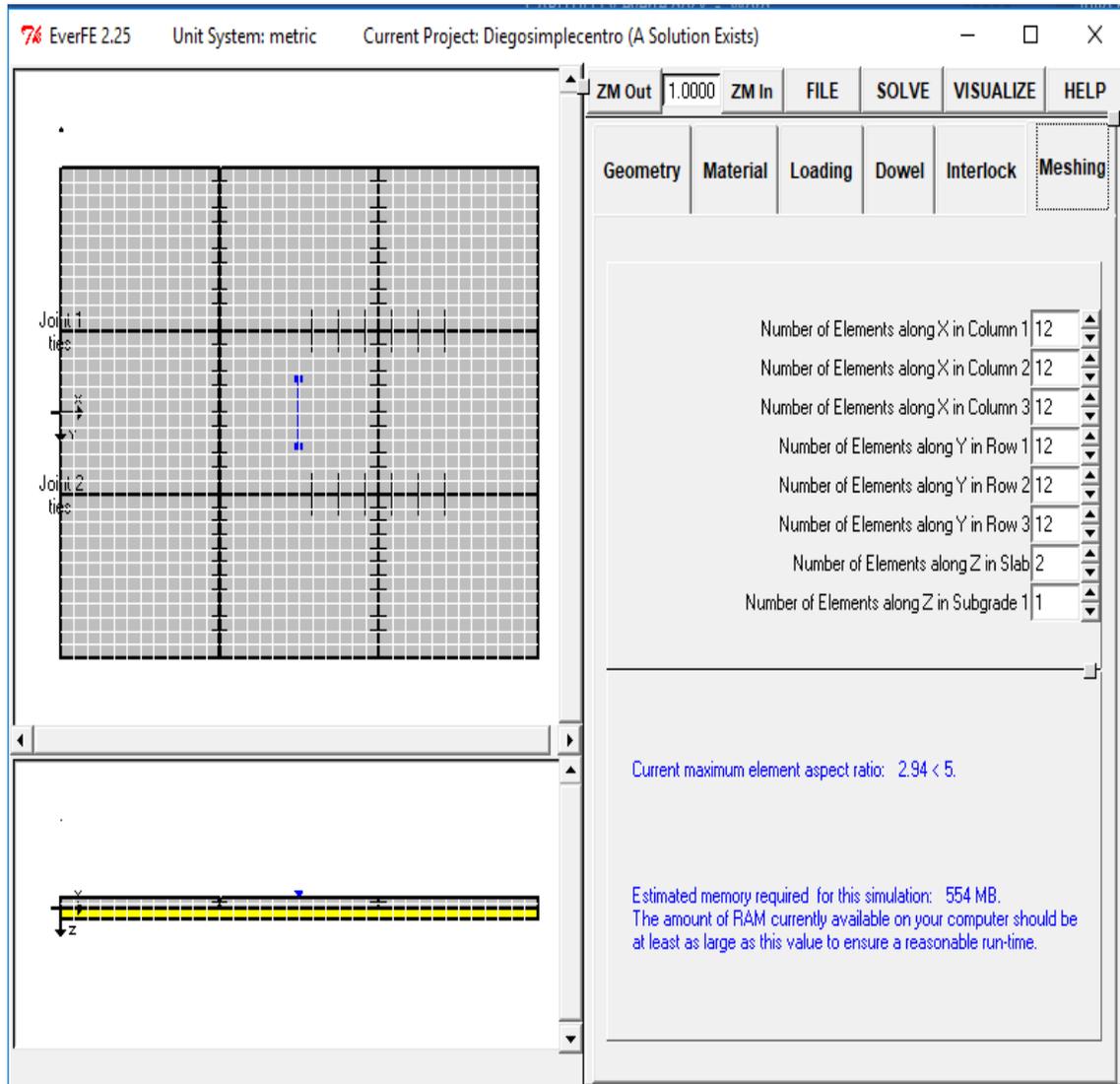


Figura 5.16 Ingreso de datos en pestaña Mallado.

Luego se debe guardar el archivo antes de resolver. Posteriormente a guardar el archivo se procede a dar click en:

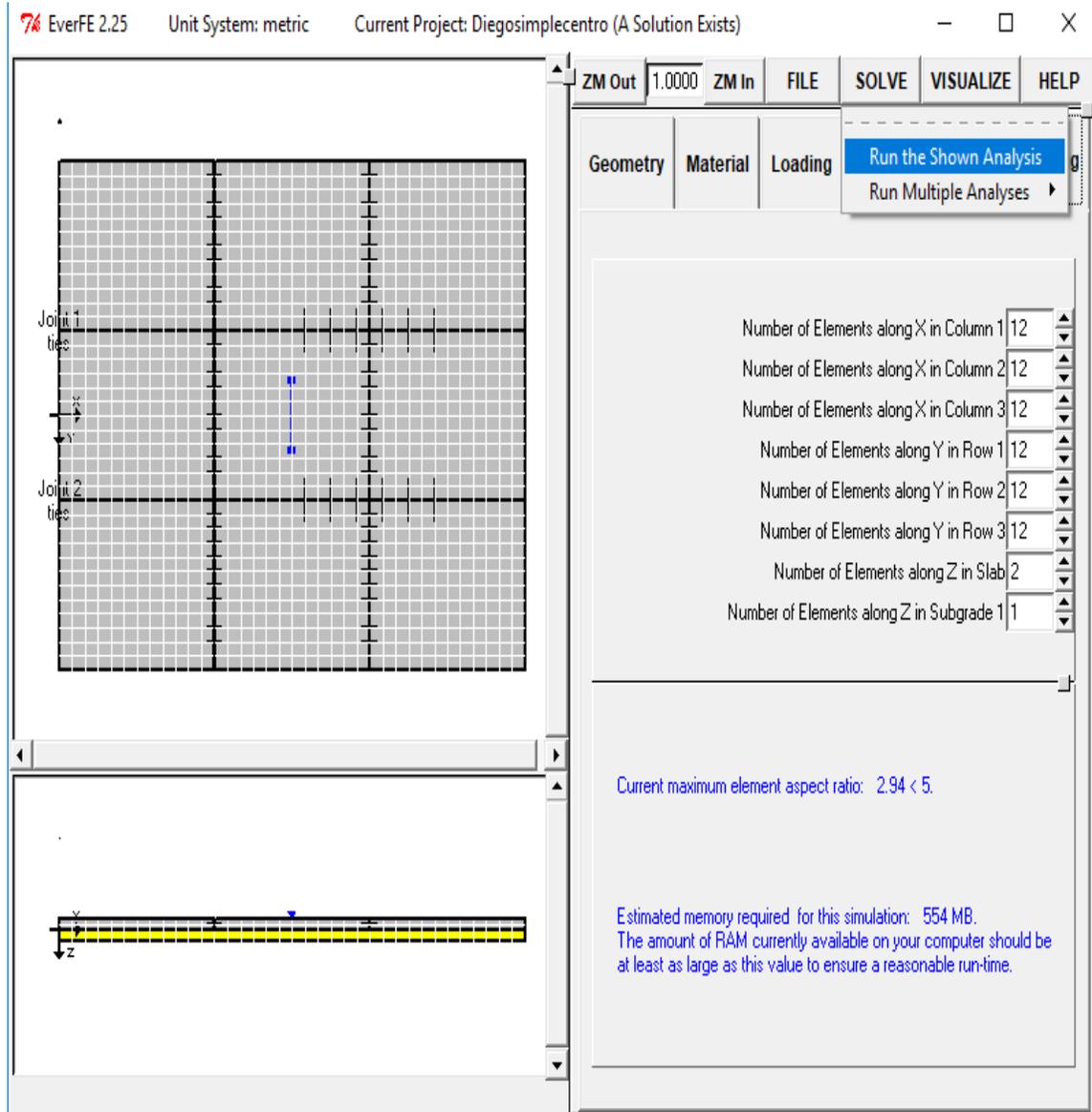


Figura 5.17 Compilación del programa previa obtención de resultados.

Luego, al haber compilado el programa, se debe ingresar en la pestaña visualizar. Los resultados obtenidos para este caso se muestran a continuación:

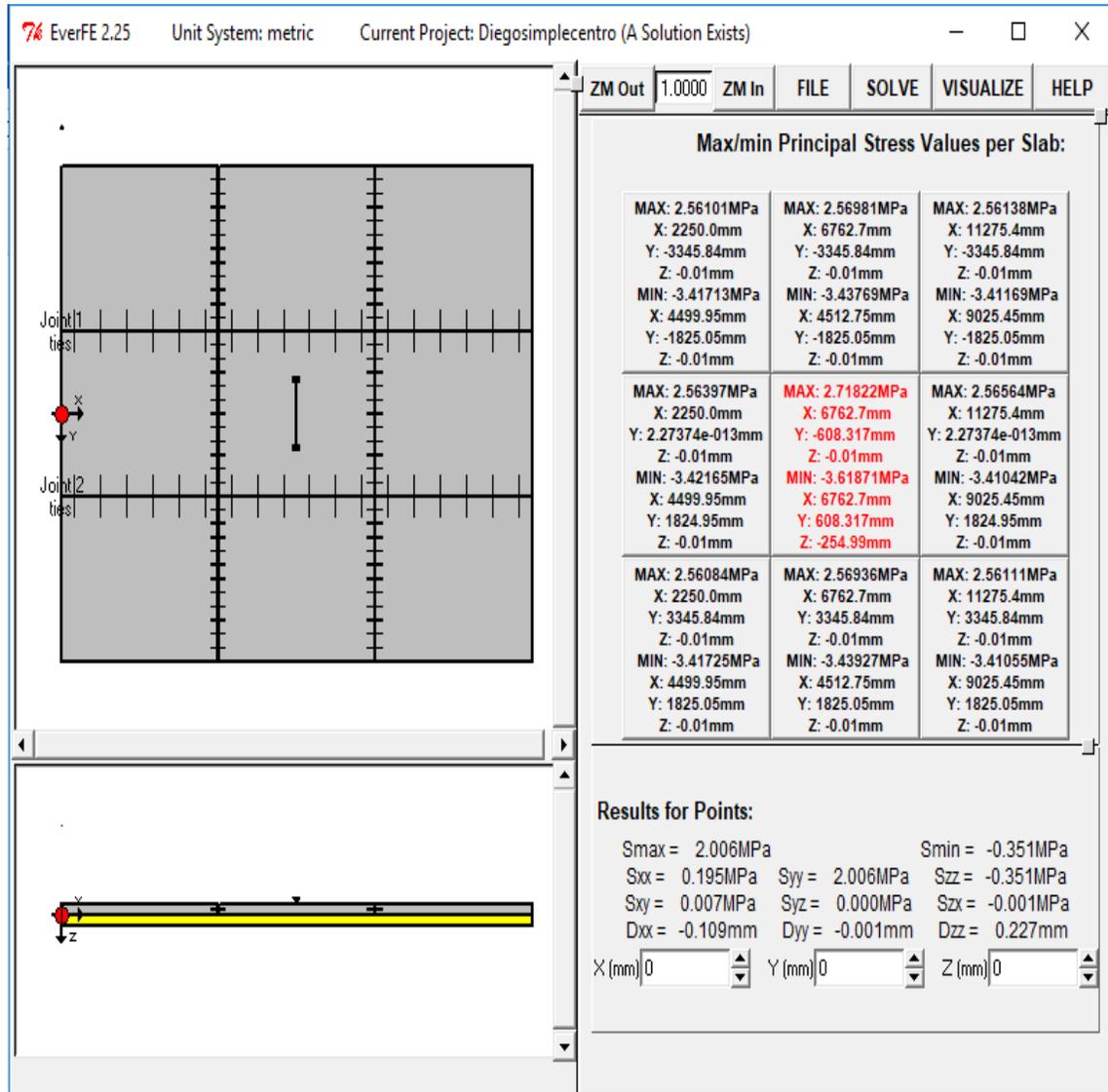


Figura 5.18 Esfuerzos máximos principales.

Se observa que la casilla marcada en rojo es la que muestra los valores máximos de esfuerzos en la losa. Además de esfuerzos, es posible observar de qué manera se ve afectada la losa con respecto a la deformación. Cabe recalcar que el caso mostrado es para un diferencial térmico positivo, dicho resultado se muestra a continuación:

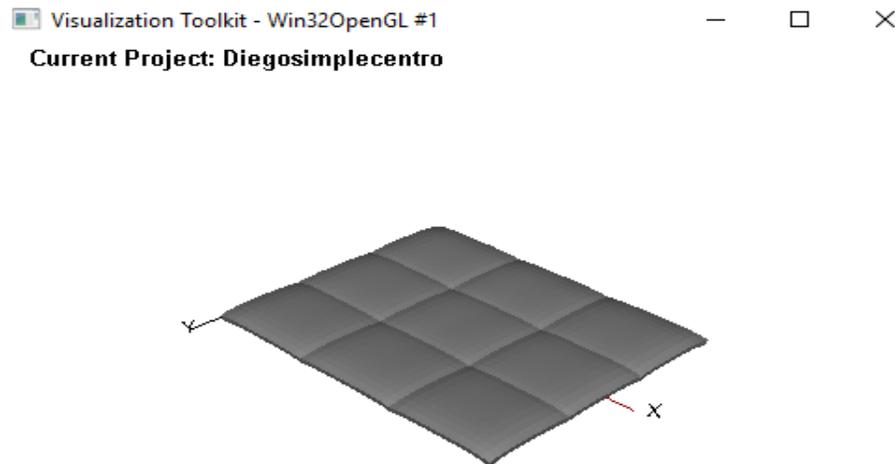


Figura 5.19 Deformación de la configuración de losas debido principalmente al gradiente térmico positivo.

En el caso de haber ingresado un valor negativo de diferencial térmico, es posible que el resultado de deformación sea el siguiente:



Figura 5.20 Deformación de la configuración de losas debido principalmente al gradiente térmico negativo.

Además de las deformaciones, es posible obtener el valor de la deformación máxima a partir del ingreso de su coordenada, como se muestra a continuación:

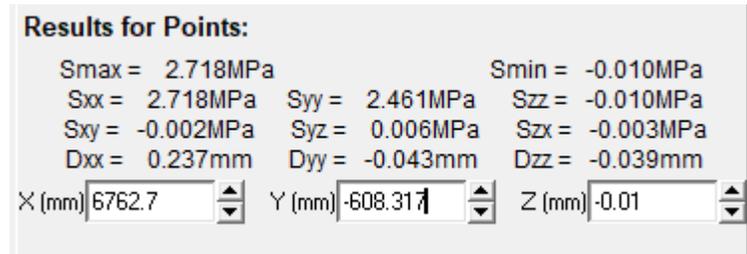


Figura 5.21 Resultados de esfuerzos por puntos.

Como un extra se puede observar la distribución de esfuerzos en la losa a través del mapa de color o contorno. A continuación, se muestra la distribución para la superficie y el fondo de la losa:

Superficie:

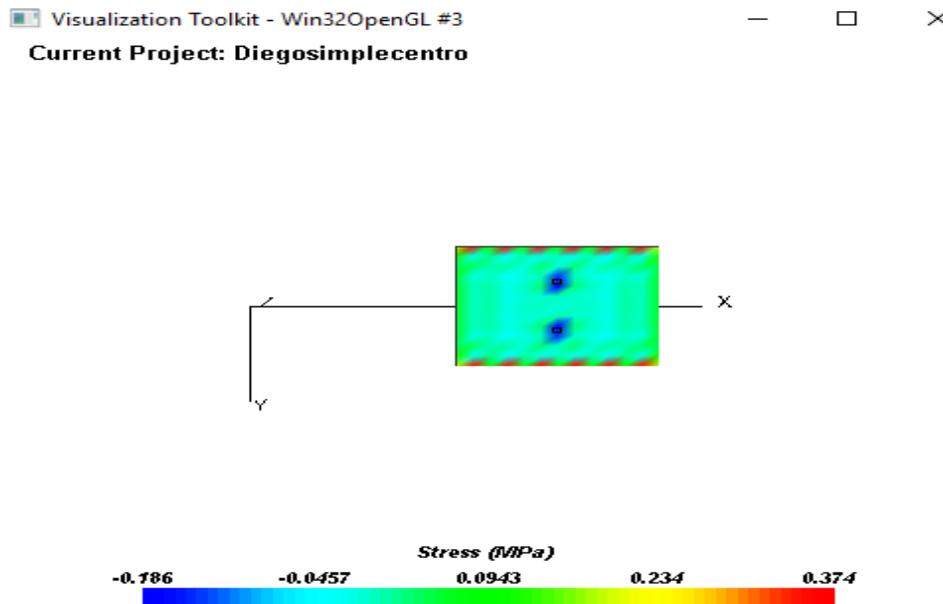


Figura 5.22 Resultados de esfuerzos en la superficie de la losa a través de mapas de color.

Fondo:

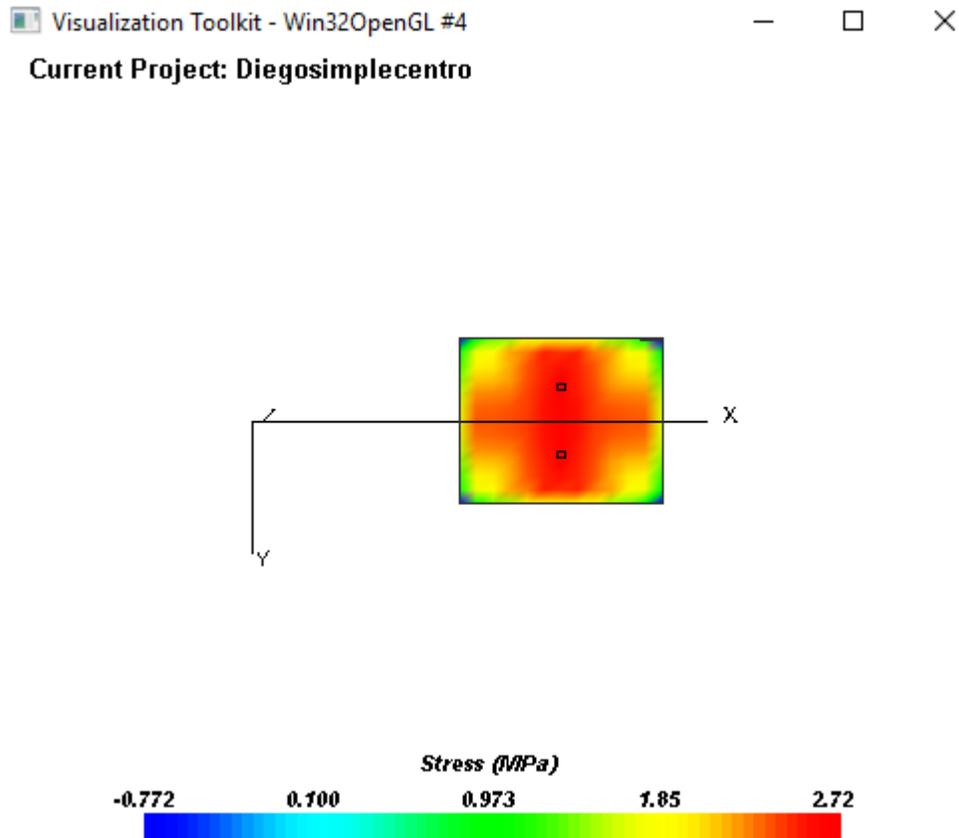


Figura 5.23 Resultados de esfuerzos en el fondo de la losa a través de mapas de color.

De esta manera queda demostrado el ingreso de los datos al software EverFe y de qué forma se extraen los resultados.

A continuación, se presentan los resultados para las demás condiciones de carga evaluando también los diferenciales térmicos máximos positivos y negativos, así como diferenciales promedios positivos y negativos:

POSICIÓN DEL EJE	MÁXIMO POSITIVO (Mpa)	MÁXIMO NEGATIVO (Mpa)	PROMEDIO POSITIVO (Mpa)	PROMEDIO NEGATIVO (Mpa)	ESFUERZO DEL EJE (Mpa)
EJE SIMPLE					
CENTRO	2.718	1.738	1.751	1.148	0.166
BORDE	2.730	1.733	1.758	1.145	0.178
ESQUINA	2.567	1.819	1.596	1.233	0.182
EJE DUAL					
CENTRO	2.853	1.755	1.895	1.169	0.328
BORDE	2.887	1.915	1.761	1.174	0.346
ESQUINA	2.566	1.892	1.674	1.320	0.283
EJE TÁNDEM					
CENTRO	2.616	1.783	1.687	1.197	0.208
BORDE	2.639	1.792	1.709	1.206	0.219
ESQUINA	2.627	1.959	1.708	1.387	0.220
EJE TRÍDEM					
CENTRO	2.699	1.781	1.741	1.194	0.174
BORDE	2.735	1.797	1.763	1.210	0.182
ESQUINA	2.717	1.909	1.759	1.328	0.199

Tabla 5.5 Valores de esfuerzos para tramo I Boulevard Monseñor Romero.

PROLONGACIÓN BOULEVARD ORDEN DE MALTA Y AMPLIACIÓN CALLE HUIZÚCAR, TRAMO II.

Este tramo está conformado físicamente por 2 carriles y sin hombro (por sentido).

A continuación, se presentan las diferentes posiciones de carga que se han considerado en el análisis y la configuración geométrica de las losas:

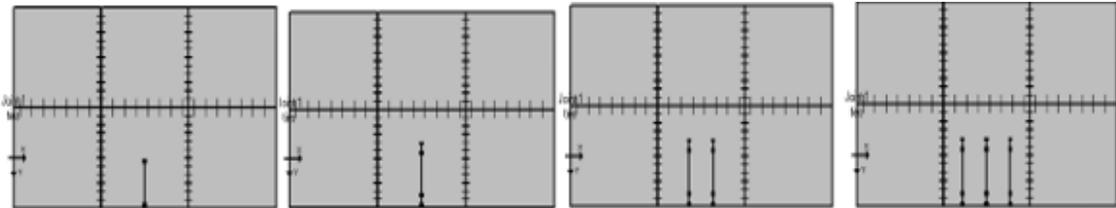


Figura 5.24 Configuración de la localización de ejes en el borde.

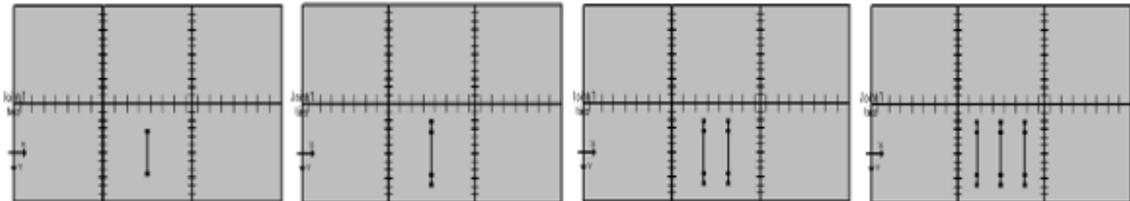


Figura 5.25 Configuración de la localización de ejes en el centro.

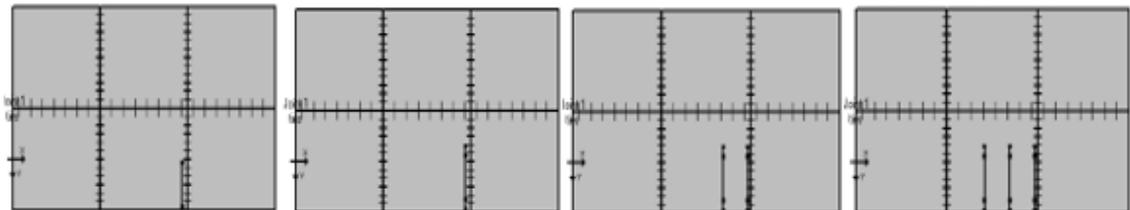


Figura 5.26. Configuración de la localización de ejes en la esquina.

Se presentan los resultados para las demás condiciones de carga evaluando también los diferenciales térmicos máximos positivos y negativos, así como los diferenciales promedios positivos y negativos:

POSICIÓN DEL EJE	MÁXIMO POSITIVO (Mpa)	MÁXIMO NEGATIVO (Mpa)	PROMEDIO POSITIVO (Mpa)	PROMEDIO NEGATIVO (Mpa)	ESFUERZO DEL EJE (Mpa)
EJE SIMPLE					
CENTRO	2.561	1.645	1.777	1.107	0.206
BORDE	2.568	1.642	1.789	1.106	0.398
ESQUINA	2.387	1.636	1.599	1.082	0.325
EJE DUAL					
CENTRO	2.735	1.766	1.957	1.116	0.397
BORDE	2.754	1.660	1.971	1.120	0.609
ESQUINA	2.387	1.639	1.663	1.111	0.491
EJE TÁNDEM					
CENTRO	2.473	1.681	1.733	1.140	0.249
BORDE	2.496	1.672	1.747	1.135	0.382
ESQUINA	2.489	1.671	1.741	1.138	0.374
EJE TRÍDEM					
CENTRO	2.555	1.690	1.776	1.150	0.206
BORDE	2.576	1.681	1.787	1.144	0.286
ESQUINA	2.566	1.664	1.788	1.121	0.328

Tabla 5.6 Valores de esfuerzos obtenidos para tramo I Boulevard Orden de Malta.

INTERCONEXIÓN NEJAPA-APOPA-TRONCAL DEL NORTE, TRAMO II.

Este tramo está conformado físicamente por 2 carriles y un hombro (por sentido).

A continuación, se presentan las diferentes posiciones de carga que se han considerado en el análisis y la configuración geométrica de las losas:

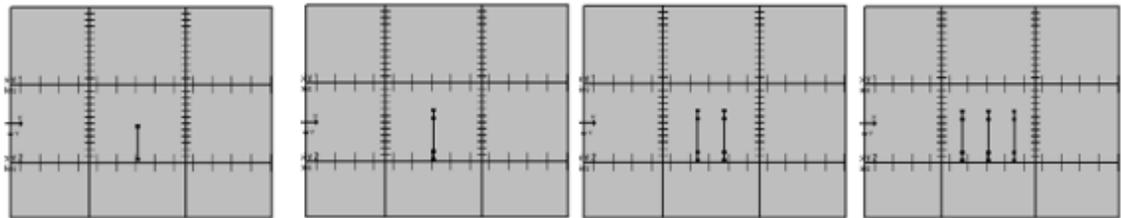


Figura 5.27 Configuración de la localización de ejes en el borde.

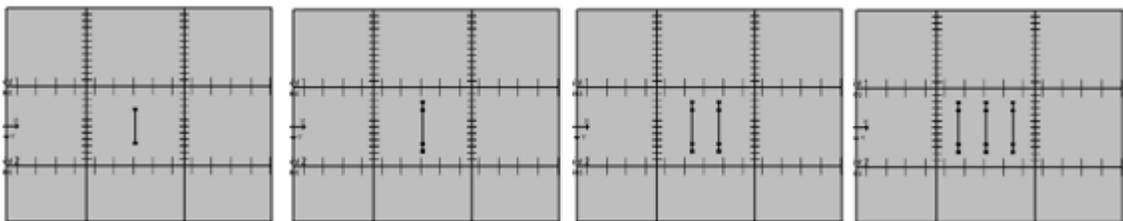


Figura 5.28 Configuración de la localización de ejes en al centro.

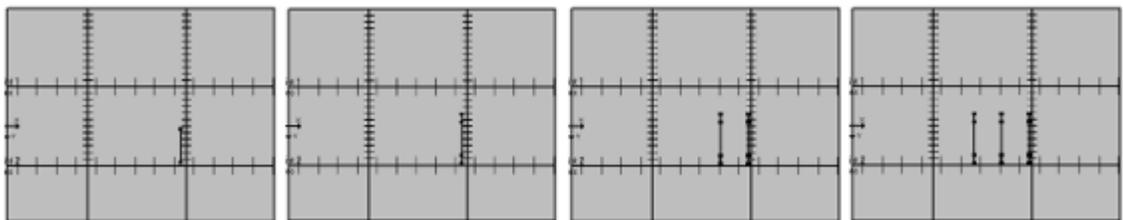


Figura 5.29 Configuración de la localización de ejes en la esquina.

Para la configuración antes mostrada, se presentan los resultados para las demás condiciones de carga evaluando también los diferenciales térmicos máximos positivos y negativos, así como diferenciales promedios positivos y negativos:

POSICIÓN DEL EJE	MÁXIMO POSITIVO (Mpa)	MÁXIMO NEGATIVO (Mpa)	PROMEDIO POSITIVO (Mpa)	PROMEDIO NEGATIVO (Mpa)	ESFUERZO DEL EJE (Mpa)
EJE SIMPLE					
CENTRO	2.899	1.822	1.847	1.333	0.218
BORDE	2.929	1.816	1.869	1.221	0.281
ESQUINA	2.709	1.831	1.713	1.284	0.272
EJE DUAL					
CENTRO	3.080	1.824	2.040	1.230	0.416
BORDE	3.124	1.813	2.076	1.218	0.444
ESQUINA	2.750	1.956	1.779	1.422	0.365
EJE TÁNDEM					
CENTRO	2.774	1.836	1.789	1.241	0.255
BORDE	2.811	1.817	1.811	1.224	0.268
ESQUINA	2.817	2.070	1.823	1.538	0.268
EJE TRÍDEM					
CENTRO	2.881	1.857	1.838	1.262	0.208
BORDE	2.913	1.845	1.866	1.252	0.225
ESQUINA	2.906	1.984	1.863	1.446	0.250

Tabla 5.7 Valores de esfuerzos obtenidos para tramo II Interconexión.

Como se observa en los resultados obtenidos de los tres tramos en estudio, los esfuerzos a tensión son evidentemente afectados por el diferencial térmico que actúa sobre la estructura del pavimento. Por otro lado, si bien es cierto que los

resultados de esfuerzos máximos a tensión son provocados por el diferencial térmico máximo positivo, cabe mencionar que este valor de esfuerzo solo se produce en un instante del día, es por eso que tendrá importancia el valor de esfuerzo obtenido a partir del valor promedio de diferencial térmico que según sea el caso lo puede causar un diferencial térmico positivo o negativo. El valor de esfuerzo para un diferencial térmico promedio se estará repitiendo constantemente a lo largo del día y noche, este esfuerzo es posible que sea el que más afecte la estructura del pavimento, esto podrá ser verificado posteriormente al realizar los análisis de erosión y fatiga correspondientes.

A continuación, se presentan los resultados de esfuerzos máximos y promedios.

TRAMO	ESFUERZO MÁXIMO (Mpa)	ESFUERZO PROMEDIO (Mpa)
BOULEVARD MONSEÑOR ROMERO SANTA TECLA, TRAMO I.	2.887	1.895
PROLONGACION BOULEVARD ORDEN DE MALTA Y AMPLIACION CALLE HUIZUCAR, TRAMO II.	2.754	1.971
INTERCONEXION NEJAPA-APOPA-TRONCAL DEL NORTE, TRAMO II.	3.080	2.076

Tabla 5.8 Resultados de esfuerzos máximos y esfuerzos promedio obtenidos en los distintos tramos en estudio.

5.2.2 ESFUERZOS CALCULADOS POR MEDIO DEL SOFTWARE APRIGID

1.0.

Los cálculos que se realizarán por medio del software ApRgid 1.0 estarán basados en los datos anteriormente proporcionados para cada tramo en estudio. Sin embargo, el software impide modelar diferentes tipos de ejes, simplemente es posible modelar el eje dual y tándem. Cabe destacar que en la utilización del software anterior (EverFe) los resultados más elevados se presentaron en los ejes simple y dual, por lo tanto, es posible la utilización del software ApRigid 1.0 con el fin de comparar los resultados obtenidos.

El software ApRigid 1.0, fue realizado en Costa Rica, país en el cual manejan su propio reglamento en base a peso máximo permisible por tipo de vehículos. La norma establece un peso máximo permitido para el eje dual de 6 toneladas y para el eje tándem de 16.5 toneladas, generando diferencia con respecto a la normativa aplicada en nuestro país.

El software presenta dos maneras de realizar los cálculos, los cuales son el método de regresión lineal múltiple y red neuronal artificial. Se presentarán los resultados de ambos análisis.

Seguidamente se presenta un ejemplo del cálculo de esfuerzos en ApRigid 1.0 para la condición de carga (eje simple y tándem), considerando la condición diurna de temperatura.

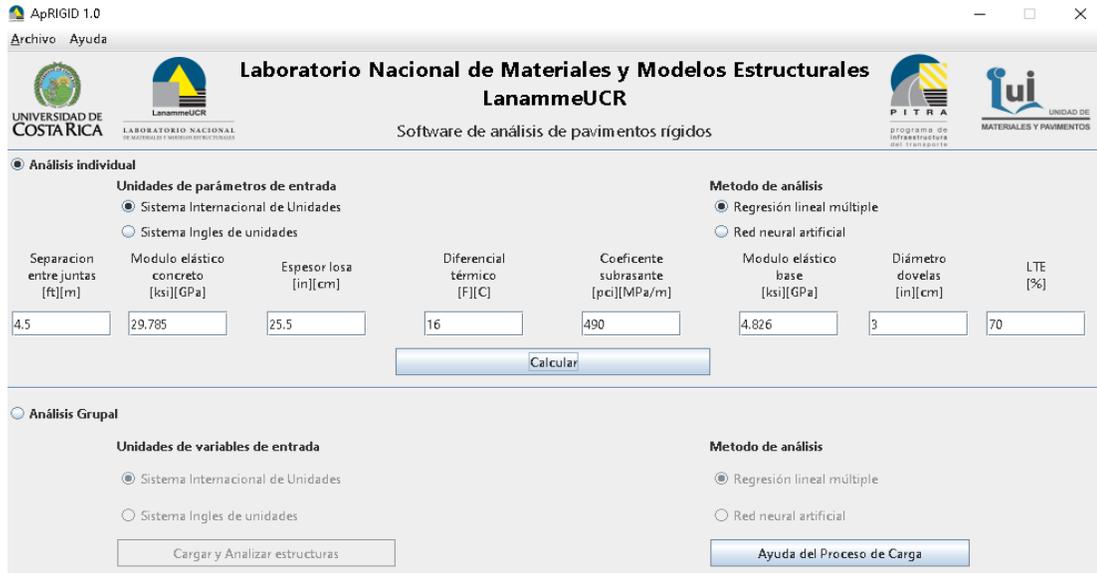


Figura 5.30 Ingreso de datos al software ApRigid 1.0

Posteriormente al ingreso de datos, se procede a hacer clic sobre el botón calcular, obteniendo en este caso los siguientes resultados:

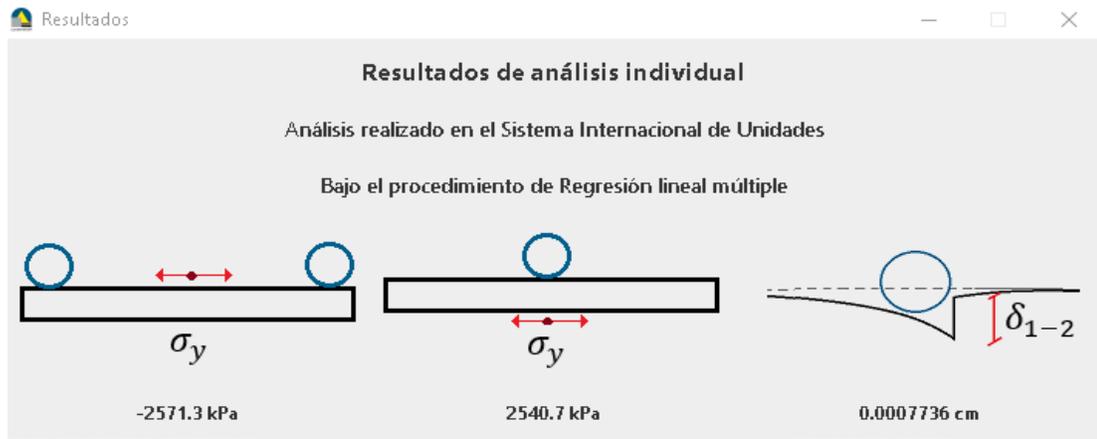


Figura 5.31 Resultados proporcionados por el software ApRigid 1.0

Se puede observar claramente que los resultados obtenidos están dados para el eje tándem y simple, además proporciona la deflexión que actúa en una losa respecto a la siguiente.

Este proceso fue repetitivo para cada tramo en estudio y para cada diferencial de temperatura a implementar, los resultados obtenidos se muestran a continuación:

TIPO DE EJE	MÁXIMO POSITIVO (Mpa)	MÁXIMO NEGATIVO (Mpa)	PROMEDIO POSITIVO (Mpa)	PROMEDIO NEGATIVO (Mpa)
BOULEVARD MONSEÑOR ROMERO SANTA TECLA, TRAMO I.				
REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE				
DUAL	2.541	0.865	1.682	0.475
TÁNDEM	2.571	1.295	1.597	0.852
RED NEURONAL ARTIFICIAL				
DUAL	1.879	0.759	1.850	0.463
TÁNDEM	1.355	1.513	1.239	1.034
BOULEVARD ORDEN DE MALTA, TRAMO II				
REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE				
DUAL	2.554	0.847	1.814	0.459
TÁNDEM	2.555	1.278	1.721	0.841
RED NEURONAL ARTIFICIAL				
DUAL	2.128	0.746	2.032	0.449
TÁNDEM	1.359	1.577	1.283	1.098
INTERCONEXIÓN NEJAPA-APOPA-TRONCAL DEL NORTE, TRAMO II				
REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE				
DUAL	3.076	1.015	2.004	0.575
TÁNDEM	3.148	1.450	1.943	0.955
RED NEURONAL ARTIFICIAL				
DUAL	1.947	0.829	1.959	0.577
TÁNDEM	1.373	1.788	1.321	1.274

Tabla 5.9 Valores de esfuerzo obtenidos a través del software ApRigid 1.0

Al igual que en la utilización del software EverFe se presentaron resultados de esfuerzos máximos y promedios. Es por ello que se presentan los resultados proporcionados por el software ApRigid 1.0:

TRAMO	ESFUERZO MÁXIMO (Mpa)	ESFUERZO PROMEDIO (Mpa)
BOULEVARD MONSEÑOR ROMERO SANTA TECLA, TRAMO I.	2.571	1.850
PROLONGACION BOULEVARD ORDEN DE MALTA Y AMPLIACION CALLE HUIZUCAR, TRAMO II.	2.555	2.032
INTERCONEXION NEJAPA- APOPA-TRONCAL DEL NORTE, TRAMO II.	3.148	2.004

Tabla 5.10 Valores de esfuerzo obtenidos a través del software ApRigid 1.0 para los tramos en estudio.

Es importante realizar una comparación entre los diferentes software utilizados para el cálculo de esfuerzos que actúan sobre la estructura del pavimento. La comparación se realizará por medio de una tabla resumen en la cual se detallarán los esfuerzos máximos y promedios.

TRAMO	EverFE 2.25		ApRigid 1.0	
	ESFUERZO MÁXIMO (Mpa)	ESFUERZO PROMEDIO (Mpa)	ESFUERZO MÁXIMO (Mpa)	ESFUERZO PROMEDIO (Mpa)
BOULEVARD MONSEÑOR ROMERO SANTA TECLA, TRAMO I.	2.887	1.895	2.571	1.850
PROLONGACION BOULEVARD ORDEN DE MALTA Y AMPLIACION CALLE HUIZUCAR, TRAMO II.	2.754	1.971	2.555	2.032
INTERCONEXION NEJAPA-APOPA-TRONCAL DEL NORTE, TRAMO II.	3.080	2.076	3.148	2.004

Tabla 5.11 Comparación de esfuerzos EverFe y ApRigid.

5.3 EVALUACIÓN DE DISEÑOS DE PAVIMENTOS RÍGIDOS

5.3.1 MODELADO CON SOFTWARE PCACALCULO 1.0

Dentro del modelado realizado por medio del software PCAcalcula 1.0, hay variables de entrada que tienden a tomar total relevancia entre las cuales están:

- Período de diseño
- Espesor de losa de concreto.
- Módulo de ruptura.
- Presencia o no de hombros.
- Presencia o no de dovelas.
- Módulo de reacción de la subbase.

- Espesor de subbase.
- Factor de seguridad.
- Tipo de ejes.
- Características de las barras de amarre.

A partir de las variables antes mencionadas se determina que el módulo de ruptura, espesor de losa de concreto y módulo de reacción del conjunto son las variables que más influyen en la determinación de los porcentajes de erosión y fatiga.

A continuación, se presentan tanto la modelación como los resultados obtenidos de los tramos en estudio, para estimar sus respectivos porcentajes de erosión y fatiga. Cabe mencionar que el software presenta ciertas limitantes en cuanto al ingreso de los datos ya que solo admite valores predeterminados para algunas de sus opciones, caso muy común en los software gratuitos de código abierto, por lo que, para cada modelo se tomaron las consideraciones pertinentes para la obtención de resultados.

BOULEVARD MONSEÑOR ROMERO SANTA TECLA, TRAMO I

Inicialmente se realizó el ingreso de variables obligatorias para el software, dentro de ellas las repeticiones de ejes esperados. Las repeticiones esperadas fueron calculadas a partir de datos de tránsito proporcionados en los informes

dovelas. En el caso de las barras de amarre el software nos recomienda que tengan una longitud de 85 cm y una separación entre barras de 110 cm, en los planos proporcionados establecen una separación de 75 cm y una longitud de 92 cm. Al realizar la comparación entre lo que recomienda el software y lo estipulado en los planos se determina que lo empleado tendrá total funcionalidad. En el caso de las dovelas el software nos recomienda que tengan una longitud de 45 cm, separación entre dovelas de 30 cm y diámetro de 3.49 cm, en los planos proporcionados establecen una longitud de 46 cm, separación entre dovelas de 30 cm y diámetro de 3.18 cm. Al realizar la comparación entre lo que recomienda el software y lo estipulado en los planos se determina que lo empleado tendrá total funcionalidad.

El software nos muestra también la posibilidad de realizar un análisis de sensibilidad, en el cual se observa la influencia que tienen las variables: espesor, módulo de ruptura y módulo de reacción. La influencia el software la muestra de la siguiente manera:

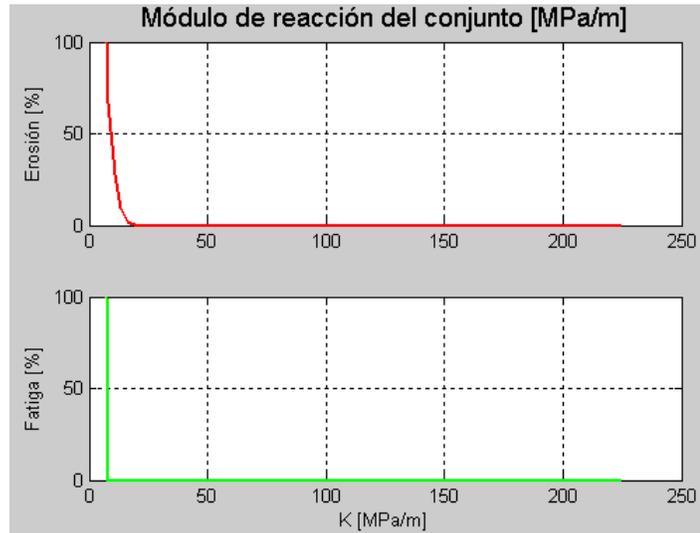


Figura 5.33 Influencia del Módulo de reacción en erosión y fatiga

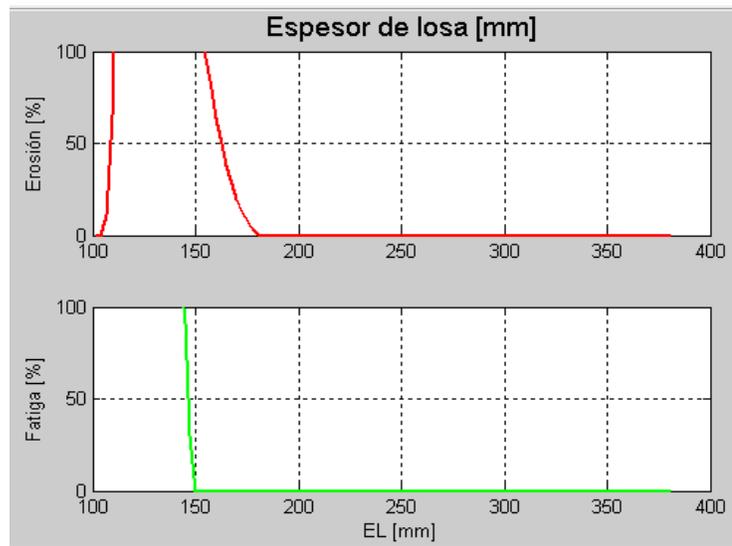


Figura 5.34 Influencia del espesor de losa en erosión y fatiga.

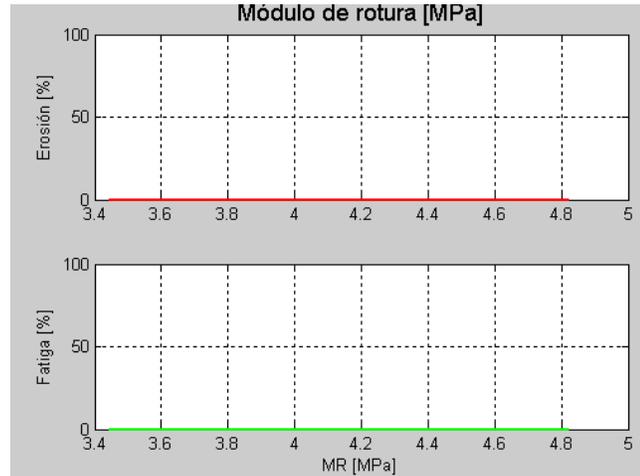


Figura 5.35 Influencia del Módulo de ruptura en erosión y fatiga.

Como se observó en las gráficas presentadas por el análisis de sensibilidad del software la erosión y la fatiga se ven debidamente afectados a partir de la variación el espesor de la losa. Para el espesor de 25.5 cm no se presenta ningún porcentaje de erosión y fatiga. Sin embargo, para un espesor de 17.0 cm se vería una clara variación en la gráfica y la estructura estaría absorbiendo cierto porcentaje de erosión y fatiga.

CÁLCULO DE REPETICIONES ESPERADAS PARA TRAMO I BOULEVARD MONSEÑOR ROMERO.

BOULEVARD MONSEÑOR ROMERO, SANTA TECLA TRAMO I											
Tipo de vehículo	Tipo de eje	KN	TPDA	% Tipo de eje	Factor sentido (dos sentidos)	Factor carril	Periodo de diseño	Factor de crecimiento anual	365 días	REPETICIONES ANUALES ESPERADAS	REPETICIONES ESPERADAS TOTALES
C-2	Simple (Delantero)	49.0333	1526	1.00	0.50	0.70	25.00	1.419	365.00	194,946.50	6,915,727.09
	Simple Dual (Trasero)	98.0665	1526	1.00	0.50	0.70	25.00	1.419	365.00	194,946.50	6,915,727.09
C-3	Simple (Delantero)	49.0333	115	1.00	0.50	0.70	25.00	1.419	365.00	14,691.25	521,172.09
	Tandem (Trasero)	161.81	115	1.00	0.50	0.70	25.00	1.419	365.00	14,691.25	521,172.09
T3-S2	Simple (Delantero)	49.0333	628	1.00	0.50	0.70	25.00	1.419	365.00	80,227.00	2,846,052.83
	Tandem (Delantero)	156.91	628	1.00	0.50	0.70	25.00	1.419	365.00	80,227.00	2,846,052.83
	Tandem (Trasero)	156.91	628	1.00	0.50	0.70	25.00	1.419	365.00	80,227.00	2,846,052.83
BUS	Simple (Delantero)	49.0333	145	1.00	0.50	0.70	25.00	1.419	365.00	18,523.75	657,130.03
	Simple Dual (Trasero)	98.0665	145	1.00	0.50	0.70	25.00	1.419	365.00	18,523.75	657,130.03

Tabla 5.12 Repeticiones esperadas Tramo I Boulevard Monseñor Romero.

Se obtuvieron los porcentajes consumidos de erosión y fatiga los cuales tienen un valor igual a 24.46% y 0% respectivamente. En este caso el porcentaje consumido de erosión es producto de que la vía no cuenta con hombros en los extremos, por lo cual no se está confinando la estructura central, provocando que la estructura absorba el porcentaje de erosión. Cabe recalcar que la estructura de pavimento se encuentra sobre diseñada, ya que los valores de porcentajes de erosión y fatiga deben ser cercanos al 100%.

Además, muestra recomendaciones tanto para las barras de amarre como para las dovelas. En el caso de las barras de amarre el software nos recomienda que tengan una longitud de 60 cm y una separación entre barras de 70 cm, en los planos proporcionados establecen una separación de 60 cm y una longitud de 70 cm. Al realizar la comparación entre lo que recomienda el software y lo estipulado en los planos se determina que lo empleado tendrá total funcionalidad en el diseño. En el caso de las dovelas el software nos recomienda que tengan una longitud de 40 cm, separación entre dovelas de 30 cm y diámetro de 2.86 cm, en los planos proporcionados establecen una longitud de 46 cm, separación entre dovelas de 40 cm y diámetro de 2.86 cm. Al realizar la comparación entre lo que recomienda el software y lo estipulado en los planos se determina que el diseño tendrá total funcionalidad.

El análisis de sensibilidad se muestra a continuación:

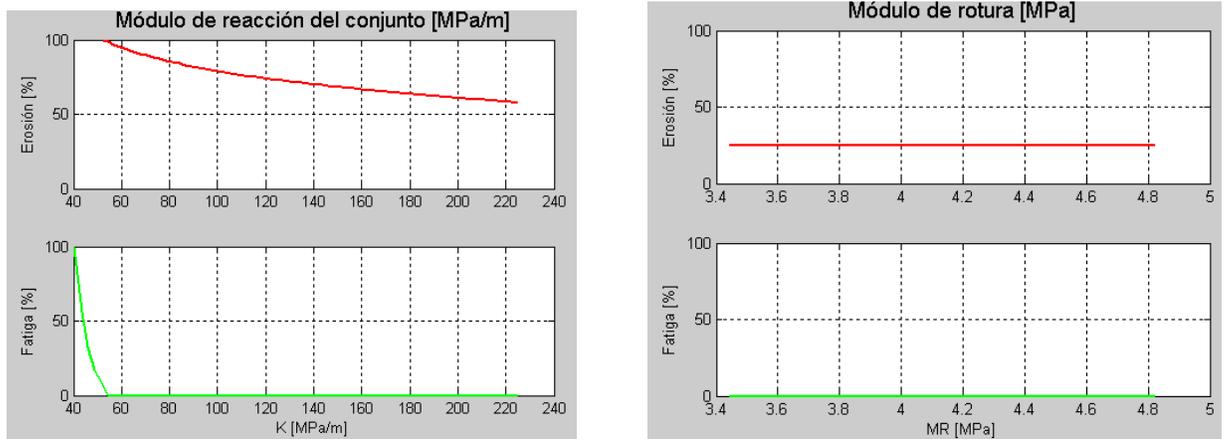


Figura 5.37 Influencia del módulo de reacción y Módulo de rotura en erosión y fatiga.

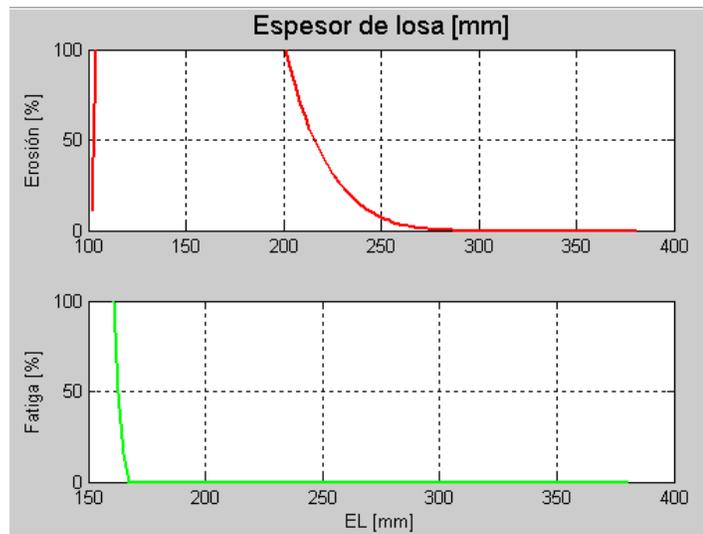


Figura 5.38 Influencia del espesor de losa en erosión y fatiga.

Como se observó en las gráficas presentadas por el análisis de sensibilidad del software la erosión y la fatiga se ven debidamente afectados a partir de variar el espesor de la losa. Para el espesor de 23 cm se determina que la estructura no absorbe ningún porcentaje de fatiga. Sin embargo, si aparece un porcentaje absorbido de erosión.

CÁLCULO DE REPETICIONES ESPERADAS PARA PROLONGACIÓN BOULEVARD ORDEN DE MALTA Y AMPLIACIÓN CALLE HUIZÚCAR TRAMO II.

PROLONGACIÓN BOULEVARD ORDEN DE MALTA Y AMPLIACIÓN CALLE HUIZÚCAR TRAMO II														
Tipo de vehículo	Tipo de eje	KN	TPDA	% tipo de eje	Factor sentido (dos sentidos)	Factor carril	Periodo de diseño 1	Periodo de diseño 2	Factor de crecimiento anual	Factor de crecimiento anual	365 días	REPETICIONES ANUALES ESPERADAS	REPETICIONES ESPERADAS 10	REPETICIONES ESPERADAS TOTALES
C-2	Simple (Delantero)	49.0333	1006	1.00	0.50	0.80	10.00	15.00	1.5427	1.1600	365.00	146,876.00	2,265,856.05	4,821,498.45
	Simple Dual (Trasero)	98.0665	1006	1.00	0.50	0.80	10.00	15.00	1.5427	1.1600	365.00	146,876.00	2,265,856.05	4,821,498.45
C-3	Simple (Delantero)	49.0333	150	1.00	0.50	0.80	10.00	15.00	1.5427	1.1600	365.00	21,900.00	337,851.30	718,911.30
	Tandem (Trasero)	161.81	150	1.00	0.50	0.80	10.00	15.00	1.5427	1.1600	365.00	21,900.00	337,851.30	718,911.30
T3-S2	Simple (Delantero)	49.0333	121	1.00	0.50	0.80	10.00	15.00	1.5427	1.1600	365.00	17,666.00	272,533.38	579,921.78
	Tandem (Delantero)	156.91	121	1.00	0.50	0.80	10.00	15.00	1.5427	1.1600	365.00	17,666.00	272,533.38	579,921.78
	Tandem (Trasero)	156.91	121	1.00	0.50	0.80	10.00	15.00	1.5427	1.1600	365.00	17,666.00	272,533.38	579,921.78
BUS	Simple (Delantero)	49.0333	449	1.00	0.50	0.80	10.00	15.00	1.5427	1.1600	365.00	65,554.00	1,011,301.56	2,151,941.16
	Simple Dual (Trasero)	88.2599	449	1.00	0.50	0.80	10.00	15.00	1.5427	1.1600	365.00	65,554.00	1,011,301.56	2,151,941.16

Tabla 5.13 Repeticiones esperadas prolongación Boulevard Orden de Malta y Ampliación Calle Huizúcar Tramo II.

El análisis nos proporciona los porcentajes consumidos de erosión y fatiga los cuales tienen un valor igual a 0, por lo que para las condiciones establecidas la estructura se encuentra sobre diseñada.

Además, nos proporciona recomendaciones tanto para las barras de amarre como para las dovelas. En el caso de las barras de amarre el software nos recomienda que tengan una longitud de 70 cm y una separación entre barras de 120 cm, en los planos proporcionados establecen una separación de 90 cm y una longitud de 80 cm. Al realizar la comparación entre lo que recomienda el software y lo estipulado en los planos se determina que lo empleado tendrá total funcionalidad. En el caso de las dovelas el software nos recomienda que tengan una longitud de 40 cm, separación entre dovelas de 30 cm y diámetro de 2.86 cm, en los planos proporcionados establecen una longitud de 50 cm, separación entre dovelas de 30 cm y diámetro de 2.54 cm. Al realizar la comparación entre lo que recomienda el software y lo estipulado en los planos se determina que lo empleado tendrá total funcionalidad.

El análisis de sensibilidad se muestra a continuación:

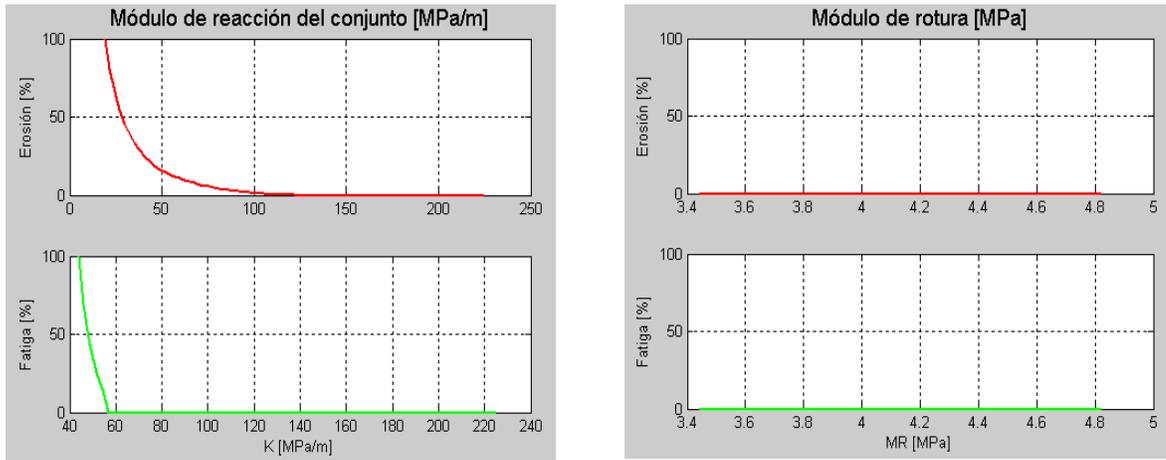


Figura 5.40 Influencia del módulo de reacción y Módulo de rotura en erosión y fatiga.

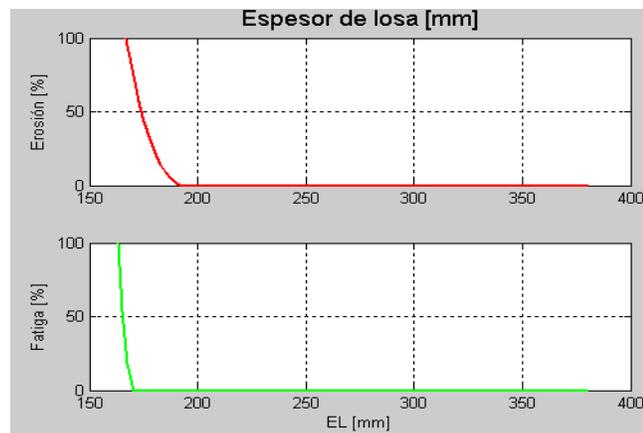


Figura 5.41 Influencia del espesor de losa en erosión y fatiga.

Como se observó en las gráficas presentadas por el análisis de sensibilidad del software la erosión y la fatiga se ven debidamente afectados a partir de variar el espesor de la losa. Para el espesor de 21.5 cm se determina que no se representa ningún porcentaje de erosión y fatiga. Sin embargo, para un espesor de 18.0 cm se vería una clara variación en la gráfica y la estructura absorbería cierto porcentaje de erosión y fatiga.

CÁLCULO DE REPETICIONES ESPERADAS PARA INTERCONEXIÓN NEJAPA – APOPA -TRONCAL DEL NORTE,
TRAMO II.

INTERCONEXIÓN NEJAPA-APOPA-TRONCAL DEL NORTE, TRAMO II										
Tipo de vehículo	Tipo de eje	TON	KN	TPDA	% Tipo de eje	Factor sentido (dos sentidos)	Factor carril	Periodo de diseño	365 días.	REPETICIONES ESPERADAS TOTALES
C-2	Simple (Delantero)	5	49.0333	508	1.00	1.00	0.80	25.00	365.00	4,637,506.00
	Simple Dual (Trasero)	10	98.0665	508	1.00	1.00	0.80	25.00	365.00	4,637,506.00
C-3	Simple (Delantero)	5	49.0333	87	1.00	1.00	0.80	25.00	365.00	790,940.00
	Tandem (Trasero)	16.5	161.81	87	1.00	1.00	0.80	25.00	365.00	790,940.00
T3-S2	Simple (Delantero)	5	49.0333	51	1.00	1.00	0.80	25.00	365.00	468,260.00
	Tandem (Delantero)	16	156.91	51	1.00	1.00	0.80	25.00	365.00	468,260.00
	Tandem (Trasero)	16	156.91	51	1.00	1.00	0.80	25.00	365.00	468,260.00
T2-s2	Simple (Delantero)	5	49.0333	86	1.00	1.00	0.80	25.00	365.00	786,755.00
	Simple Dual (Delantero)	9	88.2598	86	1.00	1.00	0.80	25.00	365.00	786,755.00
	Tandem (Trasero)	16	156.91	86	1.00	1.00	0.80	25.00	365.00	786,755.00
BUS	Simple (Delantero)	5	49.0333	117	1.00	1.00	0.80	25.00	365.00	1,071,640.00
	Simple Dual (Trasero)	10	98.0665	117	1.00	1.00	0.80	25.00	365.00	1,071,640.00

Tabla 5.14 Repeticiones esperadas Interconexión Nejapa – Apopa -Troncal del Norte, tramo II.

5.3.2 MODELADO CON SOFTWARE ME-CR RIGID 1.0

Dentro del modelado realizado por medio del software ME-CR RIGID 1.0, hay parámetros de entrada que tienden a tomar una total relevancia. Los valores a ingresar fueron definidos anteriormente ya que han sido utilizados en la modelación con los software EverFe 2.25, ApRigid 1.0 y PCAcalcula.

Los datos de entrada serán ingresados en las pestañas siguientes:

- Información general del tramo en estudio.
- Variables de desempeño.
- Respuesta del pavimento.
- Tráfico.
- Clima.
- Propiedades de la subrasante.
- Propiedades del concreto.
- Configuración del pavimento.

Para ejemplificar lo antes expuesto se presentan tanto la modelación como los resultados obtenidos de los tramos en estudio. Es importante mencionar que los resultados a obtener serán gráficos en los cuales se mostrará el desarrollo de grietas a lo largo del periodo para el cual se ha realizado el diseño. Además, el software presenta ciertas opciones predeterminadas en cuanto al ingreso de los datos, en caso que no se cuente con valores exactos, facilitando así el uso de este.

BOULEVARD MONSEÑOR ROMERO SANTA TECLA, TRAMO I

Inicialmente se realizó el ingreso de variables obligatorias en el software para cada una de las pestañas. A continuación, se presenta un ejemplo del ingreso:



The screenshot shows the 'ME-CR Rigid 1.0' software interface. The title bar indicates 'Rigid ME-CR 1.0' and 'Archivo Ayuda'. The main header features the University of Costa Rica logo and the text 'ME-CR Rigid 1.0 Diseño de Pavimentos'. Logos for PITRA (Programa de Ingeniería en Tránsito) and LanammeUCR (Laboratorio Nacional de Materiales y Mecánica Estructural) are also present. The interface has a tabbed menu with 'Propiedades de la subrasante', 'Propiedades del concreto', 'Configuración del Pavimento y Otros', 'Cálculo y resultados', 'Tráfico', and 'Clima'. The 'Información General' sub-tab is active, showing the following data entry fields:

- Vida de diseño (años): 25
- Mes de apertura al tráfico: Enero
- Tipo de Pavimento Rígido: JPCP
- Clasificación en la red vial de la carretera: 1) Autopista o red vial estratégica
- Clasificación funcional de la carretera: Arterial Principal
- Clasificación de área: Urbana

Figura 5.42 Ingreso de datos en pestaña “Información General”.

En la pestaña “Información General”, se deben ingresar características propias del tramo en estudio, como lo es el periodo de diseño y la clasificación funcional.

En la pestaña “Respuestas del pavimento”, se ingresa el valor de esfuerzo máximo obtenido a partir de los software EverFe 2.25 y ApRigid1.0.

The screenshot shows the 'Tráfico' tab of the ME-CR Rigid 1.0 software. The interface includes a header with logos for Universidad de Costa Rica, PITRA, and Laboratorio Nacional. The main area is divided into sections for vehicle types, hourly adjustment factors, and traffic growth parameters.

Tipos de vehículos (4) Cantidad de ejes según tipo de eje y vehículo

Número	Nombre	% TPDA	Simple	Tandem	Tridem	Vehículo similar (niveles 2 y 3)
1	BUS	6.02	2			
2	C2	63.21	2			
3	C3	4.76	1	1		
4	T3-S2	26.01	1	2		

Factores de ajuste horario

Valores promedio según ubicación Valores usuales

BUS	C2	C3	T3-S2
Hora	Factor (%)	Hora	Factor (%)
0:00 am	2.3	12:00 pm	5.9
1:00 am	2.3	1:00 pm	5.9
2:00 am	2.3	2:00 pm	5.9
3:00 am	2.3	3:00 pm	5.9
4:00 am	2.3	4:00 pm	4.6
5:00 am	2.3	5:00 pm	4.6
6:00 am	5	6:00 pm	4.6
7:00 am	5	7:00 pm	4.6
8:00 am	5	8:00 pm	3.1
9:00 am	5	9:00 pm	3.1
10:00 am	5.9	10:00 pm	3.1
11:00 am	5.9	11:00 pm	3.1

Factor de distribución direccional (%) 0.5

Factor de distribución por carril (%) 0.7

Tránsito promedio diario durante período de diseño Ingresar valores Calcular

Tipo de crecimiento: Lineal TPD año base: 2414 Tasa de crecimiento (%): 0.41

Figura 5.45 Ingreso de datos en pestaña “Tráfico”.

En la pestaña “Tráfico” se deben definir los vehículos y factores que han sido considerados en el análisis de tránsito de cada tramo en estudio. Además, se evalúa el crecimiento del tránsito partiendo del TPDA del año base y la tasa de crecimiento.

El programa también tiene la opción de ingresar factores de ajuste horario y mensual de manera manual o con valores sugeridos, como se muestra a continuación:

BUS		C2	C3	T3-S2
Hora	Factor (%)	Hora	Factor (%)	
0:00 am	2.3	12:00 pm	5.9	
1:00 am	2.3	1:00 pm	5.9	
2:00 am	2.3	2:00 pm	5.9	
3:00 am	2.3	3:00 pm	5.9	
4:00 am	2.3	4:00 pm	4.6	
5:00 am	2.3	5:00 pm	4.6	
6:00 am	5	6:00 pm	4.6	
7:00 am	5	7:00 pm	4.6	
8:00 am	5	8:00 pm	3.1	
9:00 am	5	9:00 pm	3.1	
10:00 am	5.9	10:00 pm	3.1	
11:00 am	5.9	11:00 pm	3.1	

Factores de ajuste mensual Valores promedio según ubicación Valores usuales

BUS		C2	C3	T3-S2
Mes	Factor (%)	Mes	Factor (%)	
Enero	100	Julio	100	
Febrero	100	Agosto	100	
Marzo	100	Septiembre	100	
Abril	100	Octubre	100	
Mayo	100	Noviembre	100	
Junio	100	Diciembre	100	

Figura 5.46 Ingreso de factores de ajuste horario y mensual con valores usuales.

Posteriormente se procede a ingresar el espectro de carga para cada tipo de eje. Los datos de espectros de carga han sido retomados de la tesis “Generación de los espectros de carga vehicular de los años 2014, 2015 y 2016 para El Salvador”, elaborada por Marvin Vitalicio López Romero.

Espectro de carga eje simple				
Carga del eje (kg)	BUS (%)	C2 (%)	C3 (%)	T3-S2 (%)
0-2000	1.9938	1.9938	1.9938	1.9938
2000-4000	3.5966	3.5966	3.5966	3.5966
4000-6000	13.9562	13.9562	13.9562	13.9562
6000-8000	17.3769	17.3769	17.3769	17.3769
8000-10000	36.7084	36.7084	36.7084	36.7084
10000-12000	17.7287	17.7287	17.7287	17.7287
12000-14000	4.8476	4.8476	4.8476	4.8476
14000-16000	2.1306	2.1306	2.1306	2.1306
16000-18000	1.3096	1.3096	1.3096	1.3096
18000-20000	0.3323	0.3323	0.3323	0.3323
20000-22000	0.0195	0.0195	0.0195	0.0195
22000-24000	0	0	0	0
24000-26000	0	0	0	0
26000-28000	0	0	0	0
28000-30000	0	0	0	0
30000-32000	0	0	0	0

Figura 5.47 Espectro de carga para el eje simple.

Espectro de carga eje tandem		
Carga del eje (kg)	C3 (%)	T3-S2 (%)
0-2000	0.0394	0.0394
2000-4000	0.1734	0.1734
4000-6000	2.2682	2.2682
6000-8000	6.8540	6.8540
8000-10000	9.6622	9.6622
10000-12000	9.6307	9.6307
12000-14000	11.6407	11.6407
14000-16000	33.7261	33.7261
16000-18000	22.3672	22.3672
18000-20000	2.8121	2.8121
20000-22000	0.4749	0.4749
22000-24000	0.2404	0.2404
24000-26000	0.0689	0.0689
26000-28000	0.0296	0.0296
28000-30000	0.0098	0.0098
30000-32000	0.0020	0.0020

Figura 5.48 Espectro de carga para el eje tándem.



Figura 5.49 Ingreso de datos en pestaña “Clima”.

En la pestaña “Clima”, los diferenciales térmicos se pueden ingresar de diferentes maneras. Para este caso se seleccionarán los valores predeterminados, dichos valores se muestran a continuación:



Figura 5.50 Diferenciales de temperatura entre la superficie y la base de la losa.

Rigid ME-CR 1.0

Archivo Ayuda

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

ME-CR Rigid 1.0
Diseño de Pavimentos

PIYRA
PROGRAMA DE INVESTIGACION EN INGENIERIA

LanammeUCR
LABORATORIO NACIONAL DE MATERIAS Y MECANICA ESTRUCTURALES

Propiedades de la subrasante | Propiedades del concreto | Configuración del Pavimento y Otros | Cálculo y resultados

Información General | Variables de desempeño | Respuestas del pavimento | Tráfico | Clima

Propiedad de la subrasante (unidad) | Ingresar Valor | Usar correlación | Usar valores típicos

Módulo de reacción (MPalm)

Valor Único
490

Valor Mensual

Valor Semestral

Valor Anual

AASHTO 1993

Valor usual según calidad (AASHTO 1993)

PCA 1984

Sobrecarga en la subrasante (kg) | 5

Porcentaje de subrasante pasando malla #200 (%) | 20

Figura 5.51 Ingreso de datos en pestaña “Propiedades de la subrasante”.

En la pestaña “Propiedades de la subrasante” se debe ingresar un parámetro fundamental que es el valor de módulo de reacción. En este caso se ingresó directamente el valor, pero el software presenta más opciones, dentro de ellas las correlaciones por AASHTO 93 y PCA, además se pueden usar valores típicos según la calidad del suelo.

ME-CR Rigid 1.0
Diseño de Pavimentos

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

PROGRAMA DE INGENIERÍA DE TRANSPORTES
LABORATORIO NACIONAL DE MATERIALES Y MECÁNICA ESTRUCTURAL

Propiedades de la subrasante | Propiedades del concreto | Configuración del Pavimento y Otros | Cálculo y resultados

Información General | Variables de desempeño | Respuestas del pavimento | Tráfico | Clima

Propiedad del concreto (unidad) | Ingresar Valor | Usar correlación | Usar valores típicos

Módulo de ruptura MR (MPa) Valor Único MEDPG Cárdenas, 2004

4.5

Modelo de ganancia de resistencia

Usar el siguiente modelo de ganancia de resistencia de la MEPDG

$$MR_{R_{28\text{días}}} = 1 + 0,12 \times \log_{10} \left(\frac{Edad}{0,0767} \right) - 0,01566 \times \left[\log_{10} \left(\frac{Edad}{0,0767} \right) \right]^2$$

Ingresando (escoger): MR a 28 días f'c a 28 días (escoger correlación)

Módulo de elasticidad E (GPa) Valor Único Valor Único

29.7853

Modelo de ganancia de resistencia

Usar el siguiente modelo de ganancia de resistencia de la MEPDG

$$MR_{R_{28\text{días}}} = 1 + 0,12 \times \log_{10} \left(\frac{Edad}{0,0767} \right) - 0,01566 \times \left[\log_{10} \left(\frac{Edad}{0,0767} \right) \right]^2$$

Ingresando (escoger): MR a 28 días f'c a 28 días E a 28 días

Figura 5.52 Ingreso de datos en pestaña “Propiedades del concreto”.

En la pestaña “Propiedades del concreto”, se ingresan valores para el módulo de ruptura y módulo de elasticidad.

ME-CR Rigid 1.0
Diseño de Pavimentos

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

PROGRAMA DE INGENIERÍA DE TRANSPORTES
LABORATORIO NACIONAL DE MATERIALES Y MECÁNICA ESTRUCTURAL

Propiedades de la subrasante | Propiedades del concreto | Configuración del Pavimento y Otros | Cálculo y resultados

Información General | Variables de desempeño | Respuestas del pavimento | Tráfico | Clima

Longitud de losas (m)

Espesor de losas (cm)

Presencia de dovelas de transferencia de carga

Diámetro de dovelas (cm)

Transferencia de carga (%)

Espesor subbase (cm)

Módulo elástico subbase (Pa)

Factor de erodabilidad base/subbase

Profundidad a la capa rígida (cm)

Radio de contacto de carga (cm)

Figura 5.53 Ingreso de datos en pestaña “Configuración del pavimento”.

En la pestaña “Propiedades del concreto”, se deben ingresar características geométricas del tramo en estudio.

Luego se procede a compilar el software y proporciona los siguientes resultados:

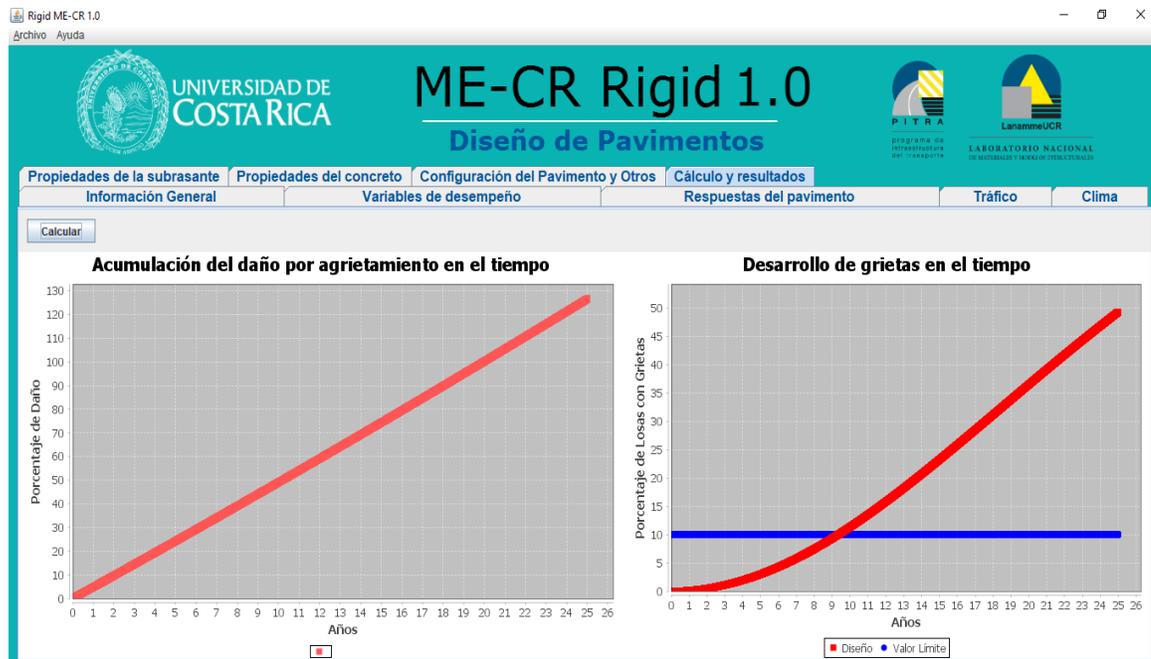


Figura 5.54 Resultados desarrollo de grietas en el tiempo.

Como es posible observar, el desarrollo de grietas alcanzará el valor límite sugerido del 10% a la edad de 9 años. El límite se establece en base a la clasificación funcional de la vía. Dicho valor es en este caso considerablemente bajo, por lo que no será nocivo para la estructura. Esto fue posible evidenciarlo en la visita de campo realizada al tramo en cuestión.

Es importante hacer mención que los esfuerzos fueron directamente ingresados en el software, en ellos se incluye el efecto térmico que actúa sobre las losas. Sin

embargo, el software tiene la opción de calcular los esfuerzos por medio de la correlación “Soluciones cerradas de Westergaard (1926) y Quirós (2015)”, la cual no toma en cuenta el efecto térmico. A continuación, se muestra la ecuación que utiliza para obtener los esfuerzos:

Soluciones cerradas de Westergaard (1926) y Quirós (2015) ×

<p style="font-size: x-small; margin: 0;">Si el vehículo es diferente a un camión con remolque</p> $\sigma_{y,s} = 2 * \left[\frac{3 * P}{h^2} * \left(1 - \left(\frac{1,772 * a}{l} \right)^{0,72} \right) \right]$ $l = \left[\frac{E * h^3}{12 * (1 - \nu^2) * k} \right]^{0,25}$ <p style="font-size: x-small; margin: 0;">Donde:</p> <p style="font-size: x-small; margin: 0;">P es la carga de llanta (lb),</p> <p style="font-size: x-small; margin: 0;">h es el espesor de la losa (in),</p> <p style="font-size: x-small; margin: 0;">a es el radio de carga (in),</p> <p style="font-size: x-small; margin: 0;">l es el radio de rigidez relativa (in),</p> <p style="font-size: x-small; margin: 0;">E es el módulo de elasticidad del concreto (psi),</p> <p style="font-size: x-small; margin: 0;">ν es el módulo de Poisson del concreto y</p> <p style="font-size: x-small; margin: 0;">k es el módulo de reacción de la subrasante (pci).</p>	<p style="font-size: x-small; margin: 0;">Si el vehículo es un camión con remolque</p> $\sigma_{y,s} = -281.12 + 102.9 * L - 63.64 * \Delta t - 3.0 * LTE - \frac{5.083 * E * L * \Delta t}{l}$ $+ \frac{1}{h^2} \left(-60509.9 * L + 52245.4 * l - \frac{116.37 * E * l * \Delta t}{L} \right) + \frac{24.061 * l * \Delta t}{L}$ <p style="font-size: x-small; margin: 0;">Con:</p> $l = \left(\frac{E * h^3}{k} \right)^{0,25}$ <p style="font-size: x-small; margin: 0;">Donde:</p> <p style="font-size: x-small; margin: 0;">σ_{y,s}=Esfuerzo longitudinal máximo en la superficie (kPa),</p> <p style="font-size: x-small; margin: 0;">L=Espaciamiento entre juntas transversales (m),</p> <p style="font-size: x-small; margin: 0;">Δt=Diferencial térmico entre la superficie y base de la losa (C),</p> <p style="font-size: x-small; margin: 0;">LTE=Eficiencia de transferencia de carga en juntas longitudinales (%),</p> <p style="font-size: x-small; margin: 0;">E=Módulo elástico del concreto (GPa),</p> <p style="font-size: x-small; margin: 0;">h=Espesor de losa (cm) y</p> <p style="font-size: x-small; margin: 0;">k=Modulo de reacción de la subrasante (MPa/m).</p>
---	---

Figura 5.55 Soluciones cerradas de Westergaard (1926) y Quirós (2015).

Al utilizar dicha opción los resultados obtenidos son totalmente diferentes, estos resultados se muestran a continuación:

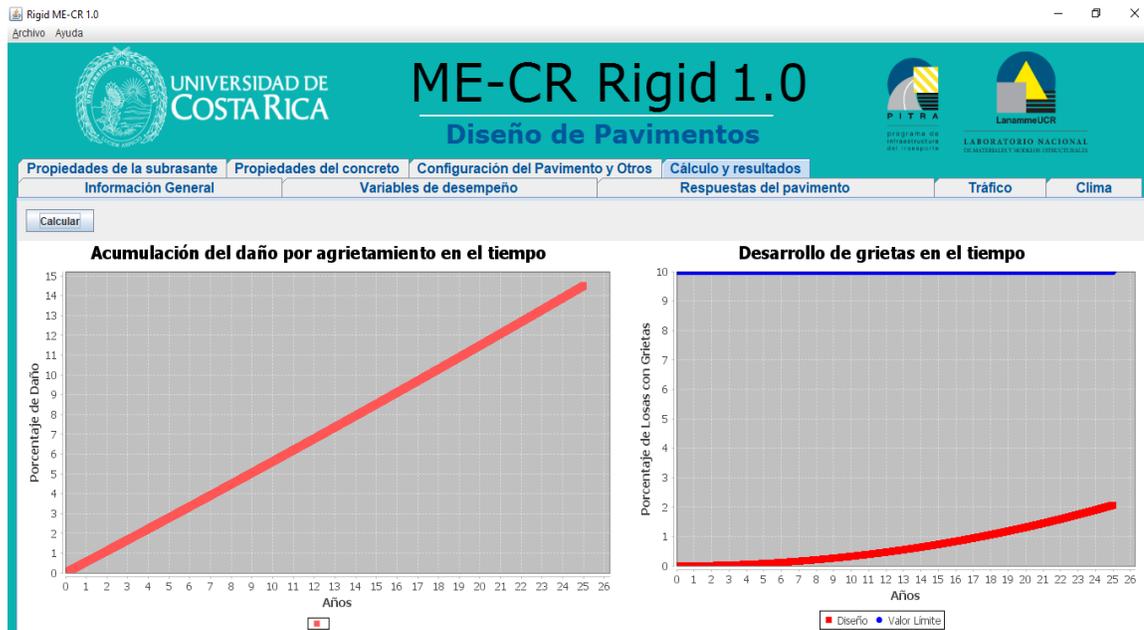


Figura 5.56 Resultados desarrollo de grietas en el tiempo.

Como es posible observar el desarrollo de grietas en el tiempo es totalmente diferente y jamás llegará a sobrepasar el límite sugerido de 10%, ya que los esfuerzos no consideran el efecto térmico.

Por lo tanto, a través de los cálculos se observa que el pavimento está sobre diseñado ya que al realizar la revisión de erosión y fatiga por medio del software PCAcálculo el porcentaje de fatiga es cero, considerando en ese caso la carga y no el efecto térmico. Por otro lado, con el software ME-CR Rigid 1.0 se comprobó que con el debido mantenimiento a lo largo del tiempo de las grietas que se generen en el pavimento el tramo estructuralmente cumplirá el periodo para el cual ha sido diseñado.

Para los otros dos tramos en estudio se siguió la misma metodología y los resultados se presentan a continuación:

INTERCONEXION NEJAPA-APOPA-TRONCAL DEL NORTE, TRAMO II.

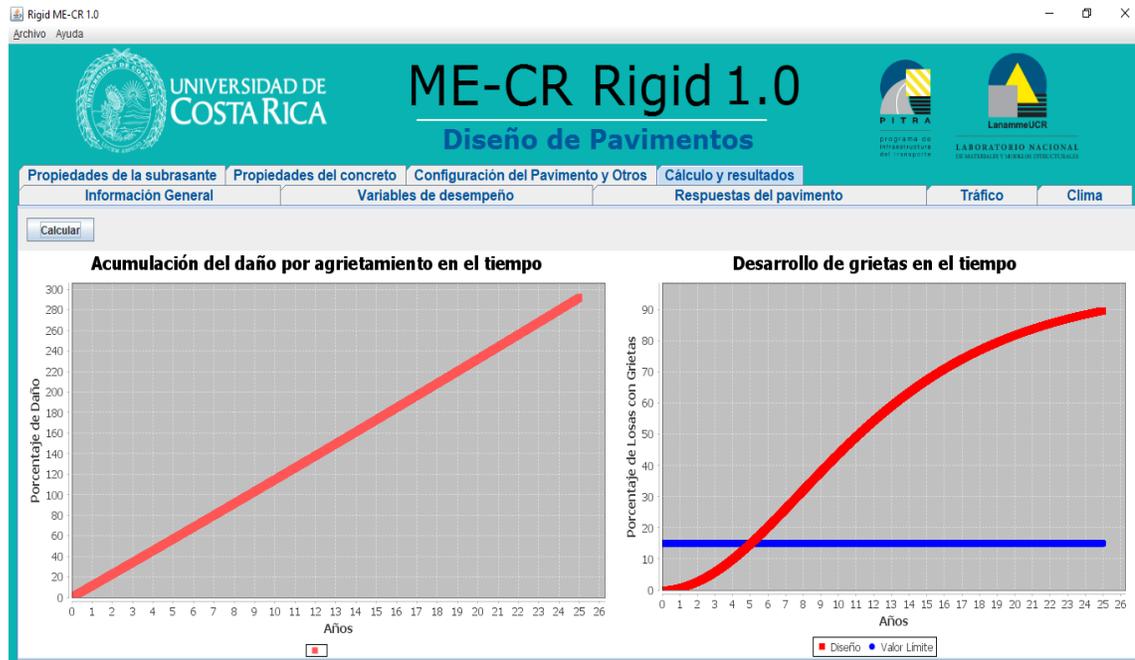


Figura 5.57 Resultados desarrollo de grietas en el tiempo.

En este caso el desarrollo de grietas en el tiempo se ve bastante afectado, el software proporciona un valor sugerido permitido de desarrollo de grietas en el tiempo de 15%. Sin embargo, este valor se sobrepasa luego de 5 años. Progresivamente las grietas van apareciendo a lo largo de la vida en servicio y para este tramo conviene incrementar el espesor de subbase y capa de rodadura reduciendo considerablemente el desarrollo de grietas en el tiempo.

Los valores obtenidos de desarrollo de grietas tienen concordancia con el estado actual del tramo. En la visita técnica realizada se evidenció la notable presencia de daños a lo largo del tramo.

Para el análisis antes realizado, cabe recalcar que se realiza ante la acción de esfuerzos que consideran el efecto térmico. A continuación, se muestra los resultados obtenidos a partir de la acción únicamente de carga:

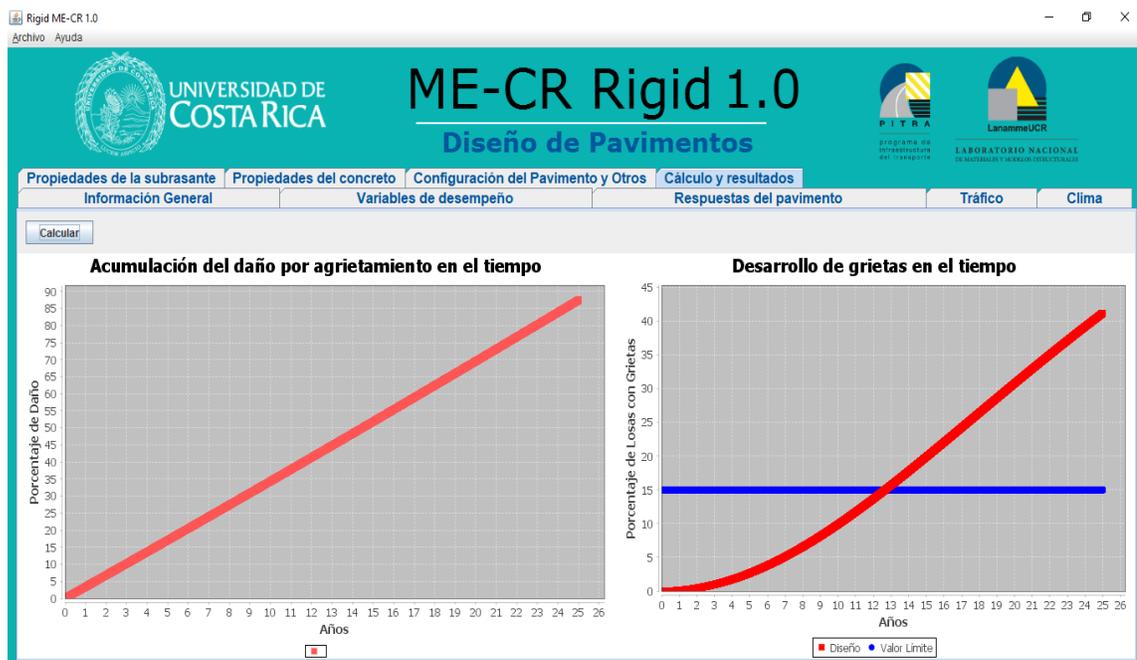


Figura 5.58 Resultados desarrollo de grietas en el tiempo.

Efectivamente se observa que el porcentaje de desarrollo de grietas en el tiempo disminuye considerablemente alcanzando el valor límite sugerido a la edad de 13 años, y además disminuye el porcentaje total obtenido al final del período.

PROLONGACIÓN BOULEVARD ORDEN DE MALTA Y AMPLIACIÓN CALLE HUIZÚCAR, TRAMO II.

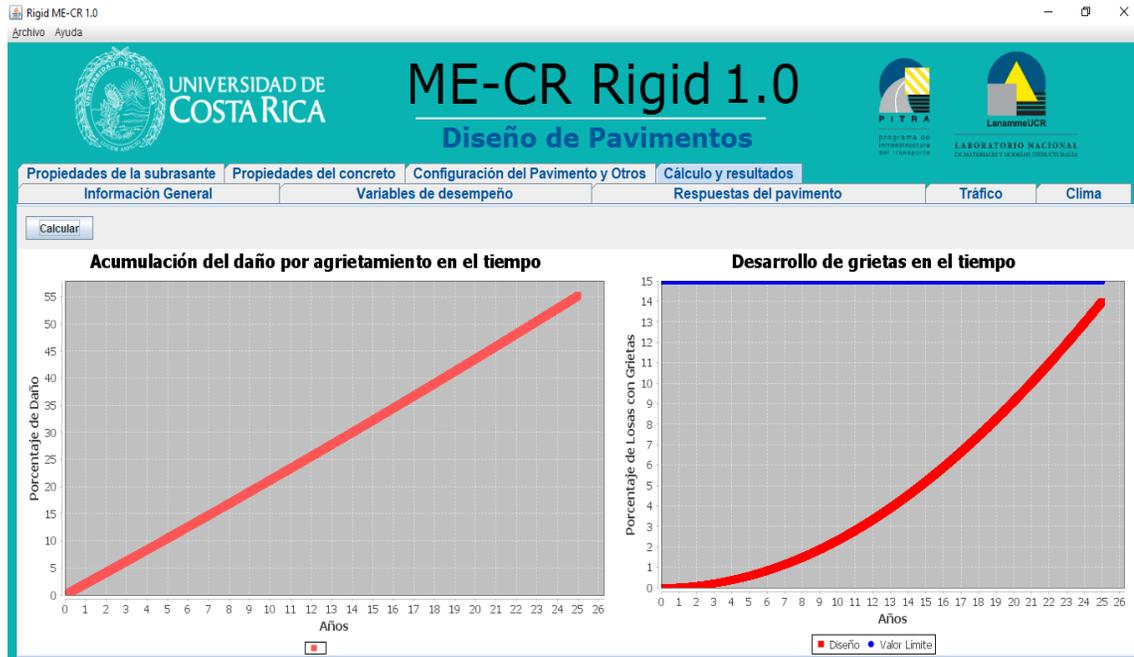


Figura 5.59 Resultados desarrollo de grietas en el tiempo.

En este caso el tramo en estudio se encuentra sobre diseñado, ya que en ningún caso el desarrollo de grietas alcanzará el valor límite permitido. Fue posible constatar lo antes mencionado a través de la visita realizada ya que el tramo está en perfectas condiciones y no se observó ningún tipo de grieta, además se notó poca presencia vehicular en la vía.

Este análisis fue realizado a partir de esfuerzos máximos que toman en consideración los efectos térmicos. A continuación, se muestran resultados de la acción exclusiva de carga:

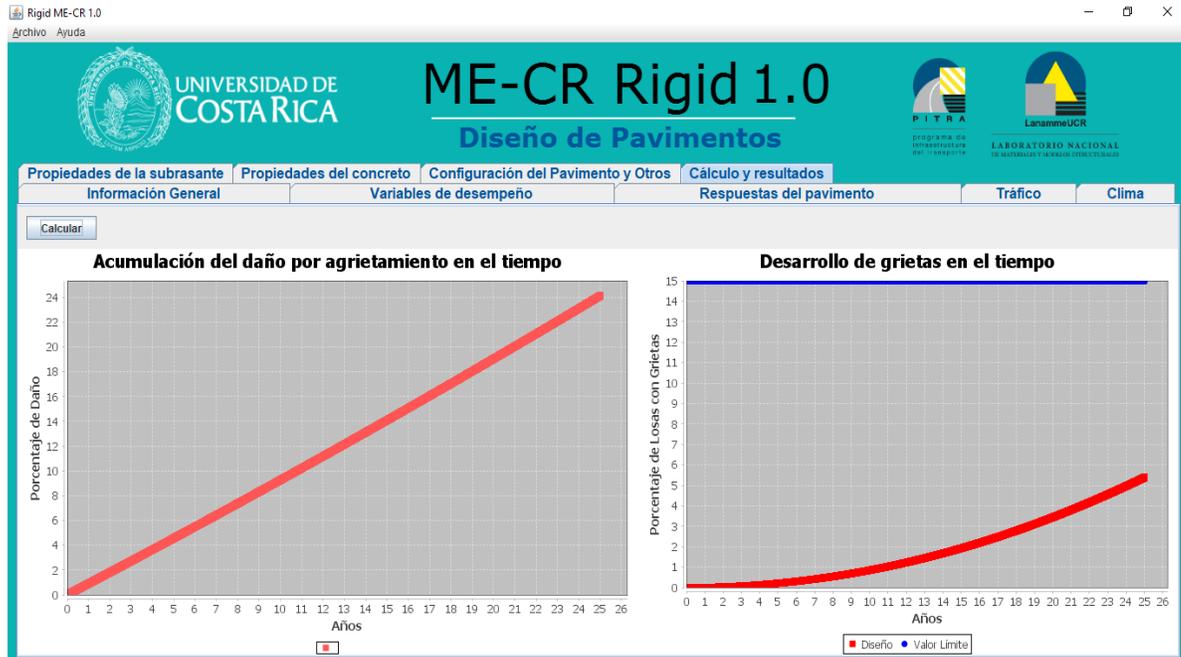


Figura 5.60 resultados desarrollo de grietas en el tiempo.

Se observa que los resultados se ven disminuidos, llegando a lo largo de la vida útil a un valor de desarrollo de grietas en el tiempo de 5.5%, entrando así en un estado de sobre diseño.

5.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Esfuerzos obtenidos por EverFe 2.25 y ApRigid 1.0.

La evaluación de esfuerzos fue de suma importancia debido a que el fenómeno de fatiga consiste en la utilización de un valor de esfuerzo repetitivo el cual causa una grieta inicial en la losa de concreto. Para evitar que este fenómeno se produzca se deben tomar factores de seguridad, los cuales deben garantizar que la losa no cederá. Un autor muy importante en el ámbito de análisis y diseño de

pavimentos es Yang H. Huang, el cual propone un factor de seguridad igual 50% del Módulo de ruptura.

Por tal razón, en los informes obtenidos de los tramos en estudio se especifican los valores de módulo de ruptura, los cuales se presentan a continuación:

TRAMO	MÓDULO DE RUPTURA (Mpa)
BOULEVARD MONSEÑOR ROMERO SANTA TECLA, TRAMO I.	4.5
PROLONGACION BOULEVARD ORDEN DE MALTA Y AMPLIACION CALLE HUIZUCAR, TRAMO II.	4.5
INTERCONEXION NEJAPA-AOPATRONCAL DEL NORTE, TRAMO II.	4.0

Tabla 5.15 Módulos de ruptura para cada tramo en estudio.

Es necesario realizar una comparación entre el factor de seguridad a considerar y los valores de esfuerzos considerados como importantes para el análisis de fatiga. A continuación, se presenta una tabla comparativa para lo antes mencionado:

TRAMO	ESFUERZO MÁXIMO (Mpa)	ESFUERZO PROMEDIO (Mpa)	50% MR
BOULEVARD MONSEÑOR ROMERO SANTA TECLA, TRAMO I.	2.887	1.895	2.250
PROLONGACION BOULEVARD ORDEN DE MALTA Y AMPLIACION CALLE HUIZUCAR, TRAMO II.	2.754	1.971	2.250
INTERCONEXION NEJAPA-APOPA-TRONCAL DEL NORTE, TRAMO II.	3.080	2.076	2.000

Tabla 5.16 Comparación de esfuerzos máximos y promedios con el 50% del MR.

La tabla anterior presenta valores de esfuerzo que actúan sobre las losas de concreto y los compara con el factor de seguridad. Cabe mencionar que el valor de esfuerzo máximo es producido en un instante de las 24 horas del día mientras que el valor de esfuerzo promedio con mayor seguridad es el que más veces se repetirá a lo largo de las 24 horas del día. Si bien es cierto que los valores de esfuerzo máximo sobrepasan el 50% del MR, dichos esfuerzos probablemente no son los que provocaran las fallas en el pavimento dado lo antes mencionado. En el caso de los valores de esfuerzo promedio estos son cercanos al límite permitido, por lo cual al generarse repeticiones con estos valores de esfuerzo a lo largo de la vida en servicio del pavimento probablemente estos esfuerzos sean

los que terminen produciendo las fallas debido que se ejercen constantemente en la estructura del pavimento.

Erosión y fatiga evaluada por PCAcalcula.

Con la evaluación realizada por medio del software PCAcalcula 1.0, es importante realizar un análisis puntual de lo que provoca la erosión y la fatiga.

Centrándonos específicamente en el concepto de fatiga, se determina que al realizar la revisión por PCA las tres estructuras en estudio están sobrediseñadas. Sin embargo, el método de PCA toma en cuenta únicamente las repeticiones de carga, dejando de lado los efectos térmicos que actúan sobre las estructuras de pavimento. Como se observó en el análisis de esfuerzos por medio de los software ApRigid 1.0 y EverFE 2.25, los esfuerzos mayores no eran provocados por los ejes de carga sino por los diferenciales térmicos que actuaban sobre la estructura de pavimento. Con lo antes mencionado es posible que las estructuras aun estando sobrediseñadas para el caso de carga, no cumplan para el caso en el que se combina la carga y la temperatura, ya que al haber utilizado metodologías de diseño que no toman en cuenta los factores térmicos, aún aumentado los espesores de las estructuras que el diseñador obtuvo y reconociendo que son capaces de absorber cierto porcentaje de fatiga dichas estructuras no serían las adecuadas. Se estipula “cierto porcentaje”, ya que en las visitas realizadas a los tramos en estudio se evidenció que las estructuras de

pavimento han cedido presentando colapso parcial o total sobre las losas de concreto.

En el caso de la erosión, se evidencia que la presencia de hombros a los extremos de la calzada es de suma importancia y en el caso en el que no se cuente con su presencia el porcentaje de absorción de erosión se ve aumentado.

El espesor de losa y subbase también son de suma importancia ya que al disminuirles el porcentaje de absorción de erosión se ve aumentado y seguramente esto beneficiará a que se desarrollen los diferentes tipos de fallas.

Fatiga evaluada por ME-CR Rigid 1.0.

El software es de suma importancia ya que muestra el desarrollo de grietas a lo largo del tiempo. Es evidente que los efectos térmicos en este caso si son considerados y son combinados con las cargas provocando así una acción más apegada a las condiciones reales en las que se encontrarán las diferentes estructuras de pavimentos.

Los resultados gráficos muestran un análisis del desarrollo de grietas que van a producirse y esto puede dar una muy buena medida a la hora de diseñar ya que al variar parámetros como el espesor de losa y subbase y efectos térmicos los resultados tienden a cambiar significativamente y con esto se podrían mejorar los posteriores diseños a realizar.

CAPITULO

VI

CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

1. Los esfuerzos máximos que se generan en las estructuras de pavimentos de concreto hidráulico son producidos principalmente, por la acción de la variación de temperatura máxima existente entre la parte superior de la losa de concreto y la parte inferior. Estos esfuerzos sobrepasan el factor de seguridad recomendado del 50% del Módulo de Ruptura propuesto por Yang H. Huang en la segunda edición del libro Pavement Analysis and Design.
2. Los esfuerzos promedios que se generan en las estructuras de pavimentos de concreto hidráulico son producidos principalmente, por la acción de la variación de temperatura promedio existente entre la parte superior de la losa de concreto y la parte inferior, dichos esfuerzos son los que se repiten constantemente a lo largo del día y los valores de esfuerzos obtenidos no sobrepasan el factor de seguridad recomendado del 50% del Módulo de Ruptura, propuesto por Yang H. Huang en la segunda edición del libro Pavement Analysis and Design, excepto en el tramo interconexión Nejapa - Apopa - Troncal del Norte tramo II, el cual lo excede por 0.076 Mpa.
3. Los pavimentos en estudio cumplen las sollicitaciones de erosión y fatiga bajo la metodología PCA de una manera muy holgada. Los resultados

obtenidos son de esta manera debido a que esta metodología solo considera la influencia de cargas del tránsito, pero no el efecto térmico.

4. En las diferentes pruebas realizadas se determinó que una disminución en el espesor de losa y/o subbase causa incrementos en los esfuerzos. Además, los porcentajes de erosión en las estructuras de pavimento también aumentan, por lo que, al igual que la losa de concreto la subbase debe ser debidamente diseñada.
5. El Tramo I del Boulevard Monseñor Romero cumple las solicitudes de erosión y fatiga bajo la metodología MEPDG. Logrará un desempeño favorable en sus 25 años de periodo de diseño bajo la aplicación de las cargas del tránsito. Además, al considerar el efecto térmico y de las cargas impuestas, dicho pavimento se verá afectado por el desarrollo de grietas y según resultados obtenidos a la edad de 9 años tendrá un porcentaje acumulado del 10%.
6. El tramo II Interconexión no cumple para las solicitudes de erosión y fatiga de acuerdo a la metodología MEPDG bajo la acción de las cargas del tránsito y su correspondiente efecto térmico, ya que muestra un desarrollo de grietas del 15 % valor límite recomendado por el software, alcanzándolo a la edad de 5 años. Mientras que bajo el efecto únicamente de cargas el pavimento presenta desarrollo de grietas del 15% a partir de la edad de 13 años en servicio, provocando que para ambos casos el diseño del pavimento sea susceptible a los daños.

7. Boulevard Orden de Malta cumple para las solicitaciones de erosión y fatiga de acuerdo a la metodología MEPDG, bajo la acción de cargas impuestas por el tránsito. De la misma manera, bajo la acción combinada de los efectos térmicos y de cargas de tránsito.

Por lo tanto, el pavimento se encuentra sobre diseñado, desde el punto de vista de este análisis, ya que no alcanzará el valor límite establecido por el software.

6.2 RECOMENDACIONES

1. Para cada construcción a realizarse se deben instalar tramos de prueba, en los cuales se realice la determinación de los diferenciales térmicos máximos. Con esto se tendrían valores reales y apegados a las condiciones en las que se encontrará el pavimento. Así se podrá predecir de una manera más acertada la acción que efectúa la temperatura sobre la estructura y el diseño estará orientado a que se capaz de resistirle.
2. Se deben verificar los parámetros de erosión y fatiga en los diseños de pavimentos realizados bajo la metodología AASHTO 93 en El Salvador, ya que esta metodología no les considera, de este modo se garantizará el correcto desempeño de las estructuras diseñadas.
3. Que las entidades que se dedican al diseño de estructuras de pavimentos actualicen la metodología por la cual le realizan, así se podría incluir el efecto de la temperatura que tanto perjudica la estructura. Esto con el fin de realizar unos diseños más eficientes tanto en lo económico como en lo funcional.
4. Que en las especificaciones contractuales de cualquier proyecto se exija un plan de conservación de la vía enfocado al tratamiento instantáneo de cualquier tipo de falla que pueda provocar un daño acelerado de la estructura del pavimento.

BIBLIOGRAFÍA

- Yang Huang (2004). Pavement Analysis and Design, New Jersey: Prentice-Hall, USA.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORT OFFICIALS AASHTO (1993). Guía para el diseño de estructuras de pavimento.
- National Cooperative Highway Research Program Transportation Research Board National Research Council. (2003) GUIDE FOR MECHANISTIC-EMPIRICAL DESIGN OF NEW AND REHABILITATED PAVEMENT STRUCTURES
- Secretaría de Integración Económica Centroamericana SIECA (noviembre, 2002). MANUAL CENTROAMERICANO PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS.
- Portland Cement Association de los Estados Unidos de Norte América. (1984). THICKNESS DESIGN FOR CONCRETE HIGHWAY AND STREET PAVEMENTS.
- Instituto Salvadoreño del cemento y el concreto ISCYC (2015) “Investigación de gradiente térmico en pavimentos de concreto hidráulico”. VI Congreso Iberoamericano de pavimentos de hormigón, Puerto Iguazú, Argentina.

- López Marvin (2017), Generación de los espectros de carga vehicular de los años 2014, 2015 y 2016 para El Salvador. Universidad de El Salvador.
- Alfonso Montejo (2002) Ingeniería de Carreteras, Bogotá- Colombia.
- Ricardo José Quirós Orozco (2015), Desarrollo de modelos estadísticos para la determinación de respuestas mecánicas críticas en pavimentos rígidos, Universidad de Costa rica.
- Bill Davids Ph.D (2003) EverFE Theory Manual, University of Maine.
- Luis Felipe Vargas Pérez (2013), Herramienta de cálculo para el diseño de pavimentos rígidos en Costa Rica, Universidad de Costa Rica.

ANEXOS

Estación	1A	2A	1B	3B	4B	5A	5B	6A	6B	7A	7B
Espesor de losa	25					23		20			
Prom. $\Delta t +$	9.52	7	5.04	8.34	9.95	7.76	9.71	10.23	11.9	8.98	11.13
Prom. $\Delta t -$	-5.25	-4.29	-4.62	-4.81	-4.15	-4.09	-4.99	-5.54	-6.38	-5.64	-5.68

Anexo1. Diferenciales Térmicos Máximos Promedios por Estación.

Espesor de losa	25cm	23cm	20cm
Max registrado. $\Delta t +$	16.0	14.5	19.5
Mín registrado $\Delta t -$	-8.0	-7.5	-9.5

Anexo2. Diferenciales Térmicos Máximos por Estación.

EJE SENCILLO 2016				
Rango (Kg)	Valor medio (Kg)	Peso medio en Toneladas	Frecuencia	Espectro Normalizado
0 < peso ≤ 1000	500	0.5	86	0.2147
1000 < peso ≤ 2000	1500	1.5	169	0.4219
2000 < peso ≤ 3000	2500	2.5	431	1.0759
3000 < peso ≤ 4000	3500	3.5	3668	9.1565
4000 < peso ≤ 5000	4500	4.5	27418	68.4440
5000 < peso ≤ 6000	5500	5.5	6896	17.2146
6000 < peso ≤ 7000	6500	6.5	1026	2.5612
7000 < peso ≤ 8000	7500	7.5	212	0.5292
8000 < peso ≤ 9000	8500	8.5	71	0.1772
9000 < peso ≤ 10000	9500	9.5	42	0.1048
10000 < peso ≤ 11000	10500	10.5	18	0.0449
11000 < peso ≤ 12000	11500	11.5	0	0.0000
12000 < peso ≤ 13000	12500	12.5	0	0.0000
13000 < peso ≤ 14000	13500	13.5	0	0.0000
14000 < peso ≤ 15000	14500	14.5	0	0.0000
15000 < peso ≤ 16000	15000	15.5	11	0.0275
16000 < peso ≤ 17000	16500	16.5	8	0.0200
17000 < peso ≤ 18000	17500	17.5	3	0.0075
			total	100

Anexo3.Datos para espectro de carga del eje sencillo direccional 2016

EJE SENCILLO DUAL 2016				
Rango (Kg)	Valor medio (Kg)	Peso medio en Toneladas	Frecuencia	Espectro Normalizado
0 < peso ≤ 1000	500	0.5	6	0.1173
1000 < peso ≤ 2000	1500	1.5	96	1.8765
2000 < peso ≤ 3000	2500	2.5	66	1.2901
3000 < peso ≤ 4000	3500	3.5	118	2.3065
4000 < peso ≤ 5000	4500	4.5	337	6.5872
5000 < peso ≤ 6000	5500	5.5	377	7.3690
6000 < peso ≤ 7000	6500	6.5	412	8.0532
7000 < peso ≤ 8000	7500	7.5	477	9.3237
8000 < peso ≤ 9000	8500	8.5	718	14.0344
9000 < peso ≤ 10000	9500	9.5	1160	22.6740
10000 < peso ≤ 11000	10500	10.5	708	13.8389
11000 < peso ≤ 12000	11500	11.5	199	3.8898
12000 < peso ≤ 13000	12500	12.5	122	2.3847
13000 < peso ≤ 14000	13500	13.5	126	2.4629
14000 < peso ≤ 15000	14500	14.5	66	1.2901
15000 < peso ≤ 16000	15000	15.5	43	0.8405
16000 < peso ≤ 17000	16500	16.5	45	0.8796
17000 < peso ≤ 18000	17500	17.5	22	0.4300
18000 < peso ≤ 19000	18500	18.5	10	0.1955
19000 < peso ≤ 20000	19500	19.5	7	0.1368
20000 < peso ≤ 21000	20500	20.5	1	0.0195
21000 < peso ≤ 22000	21500	21.5	0	0
TOTAL			5116	100

Anexo 4. Datos para espectro de carga del eje sencillo dual.

EJE TANDEM 2016				
Rango (Kg)	Valor medio (Kg)	Peso medio en Toneladas	Frecuencia	Espectro Normalizado
0 < peso ≤ 1000	500	0.5	0	0.0000
1000 < peso ≤ 2000	1500	1.5	20	0.0394
2000 < peso ≤ 3000	2500	2.5	19	0.0374
3000 < peso ≤ 4000	3500	3.5	69	0.1360
4000 < peso ≤ 5000	4500	4.5	221	0.4355
5000 < peso ≤ 6000	5500	5.5	930	1.8327
6000 < peso ≤ 7000	6500	6.5	1439	2.8358
7000 < peso ≤ 8000	7500	7.5	2039	4.0182
8000 < peso ≤ 9000	8500	8.5	2680	5.2814
9000 < peso ≤ 10000	9500	9.5	2223	4.3808
10000 < peso ≤ 11000	10500	10.5	2322	4.5759
11000 < peso ≤ 12000	11500	11.5	2565	5.0548
12000 < peso ≤ 13000	12500	12.5	2495	4.9168
13000 < peso ≤ 14000	13500	13.5	3412	6.7239
14000 < peso ≤ 15000	14500	14.5	6175	12.1689
15000 < peso ≤ 16000	15000	15.5	10939	21.5572
16000 < peso ≤ 17000	16500	16.5	8321	16.3980
17000 < peso ≤ 18000	17500	17.5	3029	5.9692
18000 < peso ≤ 19000	18500	18.5	957	1.8859
19000 < peso ≤ 20000	19500	19.5	470	0.9262
20000 < peso ≤ 21000	20500	20.5	142	0.2798
21000 < peso ≤ 22000	21500	21.5	99	0.1951
22000 < peso ≤ 23000	22500	22.5	64	0.1261
23000 < peso ≤ 24000	23500	23.5	58	0.1143
24000 < peso ≤ 25000	24500	24.5	16	0.0315
25000 < peso ≤ 26000	25500	25.5	19	0.0374
26000 < peso ≤ 27000	26500	26.5	14	0.0276
27000 < peso ≤ 28000	27500	27.5	1	0.0020
28000 < peso ≤ 29000	28500	28.5	2	0.0039
29000 < peso ≤ 30000	29500	29.5	3	0.0059
30000 < peso ≤ 31000	30500	30.5	0	0.0000
31000 < peso ≤ 32000	31500	31.5	1	0.0020
TOTAL			50744	100

Anexo5.Datos para espectro de carga del eje Tándem