

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



**“DESARROLLO DE ALTERNATIVA DE DISEÑO DE
ESTRUCTURA DE PAVIMENTO DE CONCRETO
HIDRAULICO MEDIANTE EL METODO MECANICISTA
EMPIRICO EN EL SALVADOR”**

PRESENTADO POR:

MILAGRO BEATRIZ CASTAÑEDA CARDOZA

DENNIS GEOVANY GOMEZ PEREZ

MICHELLE ARLENE MACIAS LEIVA

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

CIUDAD UNIVERSITARIA, MARZO DE 2015.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR

:

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

SECRETARIA GENERAL

:

DRA. ANA LETICIA ZA VALETA DE AMAYA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO

:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO

:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

DIRECTOR

:

PH.D ING. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA.

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

**“DESARROLLO DE ALTERNATIVA DE DISEÑO DE
ESTRUCTURA DE PAVIMENTO DE CONCRETO
HIDRAULICO MEDIANTE EL METODO MECANICISTA
EMPIRICO EN EL SALVADOR”**

Presentado por :

MILAGRO BEATRIZ CASTAÑEDA CARDOZA

DENNIS GEOVANY GOMEZ PEREZ

MICHELLE ARLENE MACIAS LEIVA

Trabajo de graduación aprobado por :

Docentes Asesores :

ING. MAURICIO ERNESTO VALENCIA

ING. MARIO ALEJANDRO AVELAR PINEDA

ING. JOSÉ ROBERTO DOUGLAS LEMUS

San salvador, marzo de 2015

Trabajo de graduación aprobado por:

Docentes Asesores :

ING. MAURICIO ERNESTO VALENCIA

ING. MARIO ALEJANDRO AVELAR PINEDA

ING. JOSÉ ROBERTO DOUGLAS LEMUS

AGRADECIMIENTOS

A DIOS TODOPODEROSO, por habernos permitido llegar a culminar este trabajo y llevarnos de su mano en cada paso, por abrirnos puertas donde nosotros las vimos cerradas y guiarnos a tomar las mejores decisiones con sabiduría e inteligencia conforme a su santa voluntad.

A la UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR, por permitirnos aprender y formarnos cada día para llegar a ser profesionales de excelente calidad y ética. Y por albergarnos durante estos años de estudio dando paso a un mejor desarrollo de nuestro amado país.

A TODOS LOS DOCENTES DE LA ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL, por transmitirnos sus conocimientos y brindarnos su tiempo incondicionalmente para ayudar a nuestra formación profesional.

A LOS DOCENTES QUE NOS AYUDARON EN LA TESIS:

- Ing. Mauricio Ernesto Valencia
- Ing. Roberto Douglas Lemus
- Ing. Mario Alejandro Avelar

Muchas gracias por toda su colaboración y entrega para que este trabajo de investigación se llevara a cabo de la mejor manera.

Y un agradecimiento especial a nuestros AMIGOS Y COMPAÑEROS, futuros colegas de la carrera de Ingeniería Civil:

- Ing. Angel Baltazar García Vargas
- Francisco Alberto Renderos Ferrer
- Wilfredo Llanes Trigueros
- Jhony Gámez
- Ing. Alex Javier Pineda Mancía

Por brindarnos su ayuda en la realización de esta Tesis.

“El principio de la sabiduría es el temor de Jehová”

Proverbios 1:7

LOS AUTORES.

DEDICATORIA

“Ha sido largo el viaje” que emprendí en la Universidad, con muchos retos, con muchas ilusiones y con toda la fe puesta en Dios que un día podría alcanzar la meta, desafiando todas las adversidades que en esos momentos me querían detener. Pero con firmeza comencé a construir mi camino con Jesucristo como mi fundamento principal y con mucha satisfacción puedo decir “Al fin llegué”.

A DIOS TODOPODEROSO, por permitirme en su inmensa misericordia culminar mis estudios universitarios, cuidándome en cada paso que di, y guiándome a tomar las mejores decisiones, además de darme de su sabiduría e inteligencia, ahora puedo ver su fidelidad reflejada en mí y por eso le doy toda la gloria y toda la honra.

A MIS PADRES, **Milagro de las Mercedes Cardoza de Castañeda** y **Alejandro Arístides Castañeda**, por su amor incondicional y gran apoyo, por sus desveladas, por sus oraciones, por darme ánimos cuando más lo necesite ustedes son el motor de mi vida, mis ganas de ser mejor cada día, gracias por confiar en mí y enseñarme a luchar cada día venciendo todos los obstáculos, los amo con todas mis fuerzas.

A TODA MI FAMILIA, mis hermanos y a toda la familia Cardoza les agradezco mucho todo su apoyo y amor con el que siempre me cuidaron, en especial a mi Tía **Julia Margarita Cardoza** que ha sido como una segunda madre, aconsejándome y ayudándome en todo y a mi abuela **Isabel Cardoza** que desde el cielo me cuida.

A MI NOVIO **Oscar Willian Guerrero Abrego**, por su amor y comprensión y la gran paciencia que me ha tenido y por la ayuda que me ha brindado y apoyo en los momentos difíciles.

A mi iglesia **Tabernáculo Bíblico Bautista Sonsonate**, y en especial a mi pastor **Bill Velis** y su esposa **Elin de Velis**, les agradezco su apoyo, sus consejos, gracias por ponerme retos y darme la guía de Dios para cumplirlos.

Al **MINISTERIO 3:16** que son mi gran familia y que me han acompañado siempre, me han visto crecer y me han dado ánimo para salir adelante y especialmente a mis amigos y hermanos **Franklin Zaldaña, Camilo Velis, Helena Pereira, Carolina Vásquez, Michelle Marroquín, Astrid Alvarado.**

A MIS COMPAÑEROS DE TESIS Michelle Arlene Macías Leiva, gracias por tu amistad sincera por tus ánimos cuando más los necesitaba y por aguantarme todo este tiempo fue una gran bendición trabajar con vos y **Dennis Geovany Gómez**, gracias por compartir conmigo este trabajo y por brindarme su amistad, gracias a Dios terminamos.

A **Francisco Ferrer**, Gracias por estar conmigo en las buenas y en las malas, por ayudarme en todos los trabajos que hicimos juntos (y aguantarme también) y por brindarme tu amistad te quiero mucho.

A TODOS MIS AMIGOS, que me apoyaron y ayudaron a alcanzar este logro **Kattia Zepeda** gracias hermana, **Eliezar Gil** por ayudarme a tomar la decisión de seguir adelante fue algo muy importante y Dios te uso ese día, a **Wilfredo Llanes**, a **Ledy Esquivel, Reinaldo Díaz, Ángel García, Jhony Gámez.**

A TODOS LOS DOCENTES DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL por brindarnos sus conocimientos.

“Encomienda a Jehová tu camino, y confía en él, y él hará” – Salmos 37:5

MILAGRO BEATRIZ CASTAÑEDA CARDOZA.

DEDICATORIA

Viene a mi mente, muchos sucesos durante todos mis años de estudiante de esta universidad, de la cual hoy me siento orgulloso de formar parte y de poder culminar con éxito mi formación académica en esta gran institución. Muchas cosas pasaron, buenas y malas, pero todo, al final, sirvió para bien. Y por ello quiero agradecer:

A Dios, el principio y fin, la razón de ser, mi fortaleza, por llenarme de alegría y esperanza, y cuidarme hasta el día de hoy. El que estuvo conmigo incondicionalmente durante todos estos años, y que siempre, aun en los momentos difíciles, me hizo saber que este anhelado día llegaría. Este triunfo, lo pongo a tus pies Señor, y en agradecimiento, quiero servirte con este logro cada día de mi vida.

A mis amados padres, Edgardo Elías Gómez y María del Carmen de Gómez y mi hermana Wendy Marilyn Gómez por todo su apoyo incondicional, sin el cual jamás hubiese sido posible mi formación académica. Gracias por cuidarme, aconsejarme, corregirme, y amarme sin condición. Gracias a ustedes he llegado hasta aquí. Haré todo lo posible para hacerlos feliz cada día de mi vida. No hay palabras que describan mi gratitud. Los amo.

A mis compañeras de tesis, Milagro Beatriz Castañeda Cardoza, y Michelle Arlene Macías Leiva. Gracias amigas, fuimos un buen equipo, y juntos hemos logrado este triunfo. Les deseo lo mejor de la vida, mucha felicidad, éxitos y salud cada día de vida.

A los docentes asesores, ingenieros Mauricio Valencia, Mario Alejandro Avelar y Roberto Douglas Lemus por compartir todos sus conocimientos y aportes a esta investigación. Gracias por su tiempo, por su buena voluntad y por todas las facilidades brindadas a la elaboración de este trabajo de graduación.

A todos mis amigos de esta amada e incomparable Universidad de El Salvador, a todos los que día a día hemos dado todo en pro de este sueño. Unos ya lo lograron, otros aún no. Adelante amigos. Construyamos juntos un gran país.

Dennis Geovanny Gómez

DEDICATORIA

A Dios todopoderoso, por darme la inteligencia sabiduría, por guiarme en el camino que seguí desde el inicio de mi carrera hasta el final y por darme la fortaleza de seguir siempre adelante cuando ya estaba a punto de dejarlo todo El me tomo de su mano y me ayudo a seguir.

A mi familia, ya que Dios me premio con darme 5 mujeres fuertes que me ayudaron a definir lo que soy dándome cada una un ejemplo a seguir, mi eterna Mami Nena a ser luchadora perseguir los objetivos que me proponga y alcanzarlos, mi Mami Gloria a ser fuerte y tenaz, mis tías Dinora y Maribel en ocasiones actuaron como mama y a veces como hermanas pero siempre me apoyaron, mi querida Karlita que es mi gran ejemplo a seguir, a mi Papi Daniel que me ha enseñado día a día como se sale adelante y el temor a Dios, a Dany que como sea ha sido más un hermano para mí alguien con quien reír, a Jorge y Tony mis tíos políticos que siempre me ayudaron y apoyaron los quiero mucho, mi hermano mis primos la Gaby que ha sido mi compañía durante mucho tiempo y a mi Tía Marina que ya no está con nosotros pero desde el cielo sé que me sigue apoyando, cada uno de ellos mil gracias por hacerme una mejor persona y brindarme su apoyo incondicional.

A mis amigos, que estuvieron conmigo desde el inicio de la carrera Marvin, Ronald, Aldo, Carlos, Walter, Cony, que de cada uno de ellos aprendí tantas cosas hombros en los que llore y también reí de muchas cosas, a los que hice a

medida transcurrió el tiempo **Wilfredo, Ledy, Reynaldo, Jhony, Ángel, Will jr,** con el que trabaje y tuve varias discusiones tratando de ver cuál era el mejor punto de vista pero que siempre pudimos trabajar de una buena manera con respeto, a mi querido **Fran** (mi Negrito) que hasta el día de ahora nos ayudó tanto en todas las vueltas de esta tesis te quiero mucho por todas las cosas que hemos compartido a lo largo de esta carrera, a todos que Dios los bendiga y los quiero mucho.

A mis compañeros de tesis, Dennis de usted aprendí varias cosas aunque a veces fue difícil llegar a tomar alguna decisión pudimos superar varias cosas y salir adelante, Milagro de vos he aprendido tantas cosas en realidad sos Arrecha como dice mi abuelo, amiga estas un poco loca pero tenes los pies puestos sobre la tierra te quiero un montón y espero tu vida este llena bendiciones de Dios y éxito tras éxito.

A mis asesores, por tener la paciencia de ayudarnos cuando estábamos en algún aprieto en el trabajo y por todo el apoyo que nos brindaron y los sabios consejos que seguiremos siempre.

Dejad en manos de Dios todo lo que haces, y tus proyectos se harán realidad.

Proverbios 16:3

Michelle Arlene Macias Leiva

CONTENIDO

CAPITULO I: GENERALIDADES.....	22
INTRODUCCION.....	1
ANTECEDENTES.....	3
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	8
OBJETIVOS	11
OBJETIVO GENERAL:.....	11
OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	11
ALCANCES	12
LIMITACIONES	13
JUSTIFICACION	14
CAPITULO II: GENERALIDADES SOBRE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO	15
2.1 Generalidades sobre los pavimentos de concreto hidráulico.....	16
2.1.1 Definición de pavimentos de concreto hidráulico	16
2.1.2 Estructura de los pavimentos de concreto hidráulico	17
2.2 MÉTODO DE DISEÑO PARA PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO	27
2.2.1 MÉTODOS EMPÍRICOS.....	28
2.2.2 Métodos mecanicistas-empíricos	38
CAPITULO III: ALTERNATIVA DE DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO DE CONCRETO HIDRÁULICO	79
3.1 VARIABLES DE DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO DE CONCRETO HIDRÁULICO MEDIANTE METODOLOGÍA MECANICISTA – EMPÍRICA	80

3.1.1 TRÁNSITO.....	85
3.1.2 CLIMA.....	103
3.1.3 MATERIALES	108
3.2. MODELOS DE DETERIORO PARA PAVIMENTOS SIMPLES CON JUNTAS (JPCP) EMPLEADOS PARA ANALISIS DE FALLAS EN LA ALTERNATIVA DE DISEÑO MECANICO-EMPIRICA.....	119
CAPITULO IV: ANÁLISIS COMPARATIVO	124
4.1 GENERALIDADES	125
4.2 DISEÑO POR MEDIO DEL METODO AASHTO 93	126
4.2.1 Diseño 1	127
4.2.2 Diseño 2.....	133
4.2.3 Diseño 3.....	135
4.3 DISEÑO POR MEDIO DE LA ALTERNATIVA MECANICISTA – EMPIRICA.	138
4.3.1 DISEÑO 1	138
4.3.2 DISEÑO 2	175
4.3.3 DISEÑO 3	181
4.4 ANÁLISIS COMPARATIVO DE DISEÑOS	188
Resultados Pre diseño AASHTO 93	188
Resultado análisis estructural	189
Resultado del análisis de desempeño.	190
4.5 RESULTADO DEL ANÁLISIS COMPARATIVO.	191
CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	193
5.1 CONCLUSIONES	194

5.2 RECOMENDACIONES..... 196
BIBLIOGRAFIA.....198
ANEXOS..... 200

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 6 Parámetros de deterioro evaluados en MEPDG	67
Tabla 7 Propiedades de Drenaje en rodadura de pavimentos	74
Tabla 8 Espectros de Carga, Eje Simple	87
Tabla 9 Espectro de carga, Eje Dual	89
Tabla 10 Espectros de carga, eje tándem	91
Tabla 11 Espectros de carga, eje tridem	93
Tabla 12 Tasa de Crecimiento	95
Tabla 13 Ejemplo de valores de TPDA	97
Tabla 14 Conteo de Vehículos.....	98
Tabla 15 Determinación de la clasificación vehicular.....	100
Tabla 16 Porcentajes de carriles según AASHTO	101
Tabla 17 Espaciamiento entre ejes.....	103
Tabla 18 Temperaturas anuales de San Salvador.....	106
Tabla 19 Requerimientos físicos del cemento	112
Tabla 20 Relación Agua Cemento	113
Tabla 21 Ejemplo de datos a utilizar en el diseño.....	118
Tabla 22 Datos de entrada generales para diseño 1	127
Tabla 23 Datos de entrada generales para el diseño 2	133
Tabla 24 Datos e entrada generales para el diseño 3	136
Tabla 25 Entrada general de parámetros de diseño para análisis estructural	139
Tabla 26 Parámetros geométricos de ejes de ruedas.....	143
Tabla 27 Disposición de dovelas en la estructura de pavimentos. Fuente PCA	148
Tabla 28 Dimensiones usadas para pasadores	149
Tabla 29 Esfuerzos evaluados en la prueba 1	158
Tabla 30 Datos para el análisis de deterioros	160

Tabla 31 Esfuerzos evaluados en la prueba 2	172
Tabla 32 Iteraciones realizadas	174
Tabla 33 Entrada general e parámetros de diseño para análisis estructural ..	176
Tabla 34 Esfuerzos evaluados en el diseño2 iteración 1 para las condiciones de carga y eje descritos	177
Tabla 35 Datos para el análisis de deterioros	179
Tabla 36 Entrada general de parametros de diseño para análisis estructural	182
Tabla 37 Esfuerzos evaluados en el diseño 3	183
Tabla 38 Datos para el análisis de deterioros	185
Tabla 39 Resultados Pre-Diseño AASHTO 93	188
Tabla 40 Análisis Estructural. Nota: (+) para Tensiones, (-) para Compresiones.	189
<i>Tabla 41 análisis de desempeño</i>	190
Tabla 42 Análisis Comparativo	192

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Estructura de un pavimento rígido	18
Figura 2 Distribución de cargas en el pavimento rígido	26
Figura 3 Transferencia de cargas entre losas.....	37
Figura 4 Proceso de diseño Mecanicista-Empírico	39
Figura 5 Procedimiento de diseño de espesor de losa mediante AASHTO 98 .	42
Figura 6 Posiciones críticas de cargas en losas según la PCA	51
Figura 7 Ejemplo de formulario de diseño del método de la PCA.....	57
Figura 8 Curvas de fatiga ACPA StreetPave para diferentes niveles de confiabilidad	60
Figura 9 Desempeño de los pavimentos.....	63
Figura 10 Bosquejo de proceso de diseño MEPDG.....	65
Figura 11 Esquema Conceptual del proceso de diseño.....	65
Figura 12 Software MEPDG	66
Figura 13 Pantalla de entrada del método MEPDG	67
Figura 14 Definición de parámetros para pavimentos rígidos en MEPDG	68
Figura 15 Configuraciones Vehiculares a evaluar.....	69
Figura 16 Definición de tráfico en MEPDG	70
Figura 17 Ajuste de los Factores de Trafico	70
Figura 18 Diagrama del procedimiento de diseño para alternativa Mecánica- Empírica.....	82
Figura 19 Ventana de ingreso de cargas para realizar el análisis estructural...	84
Figura 20 Espectros de Carga para Eje Sencillo	87
Figura 21 Espectro de Carga para eje sencillo dual	89
Figura 22 Espectros de carga para eje tándem	91
Figura 23 Espectro de carga para eje tridem	94
Figura 24 Alabeo por temperatura	104
Figura 25 Precipitación acumulada mensual	107

Figura 26 Temperaturas máximas mensuales de San Salvador.....	107
Figura 27 Temperaturas mínimas mensuales de San Salvador	108
Figura 28 Estructura de pavimentos de concreto hidráulico	109
Figura 29 Diseño de Espesores.....	119
Figura 30 Importancia estratégica del área metropolitana de San Salvador como centro económico y logístico.....	126
Figura 31 Descripción del proyecto.....	128
Figura 32 Datos general para el cálculo de Esal's.....	128
Figura 33 Cálculo de Esal's	129
Figura 34 Diseño del pavimento de concreto hidráulico	130
Figura 35 Valor del módulo resiliente, a partir del CBR	131
Figura 36 Evaluación del módulo de Reacción de la Subrasante	132
Figura 37 Estructura de pavimento de concreto hidráulico	132
Figura 38 Diseño de pavimento de concreto hidráulico	134
Figura 39 Estructura de pavimento de concreto hidráulico	135
Figura 40 Cálculo del módulo de reacción en la subrasante	136
Figura 41 Diseño del pavimento de concreto hidráulico	137
Figura 42 Estructura de pavimento de concreto hidráulico	137
Figura 43 Parámetros geométricos del pavimento a diseñar	141
Figura 44 Panel de entrada de propiedades mecánicas y estructurales de los materiales de la estructura de pavimento rígido	142
Figura 45 Parámetros geométricos de los ejes de rueda, eje tándem	143
Figura 46 configuraciones de localización de ejes para el análisis de esfuerzos	144
Figura 47 Panel de entrada de cargas de tráfico, características geométricas de eje de rueda y cargas originada por el gradiente de temperatura actuante en la losa. Eje Tándem	146
Figura 48 Panel de modelado de dovelas y pasadores en el proceso iterativo. Primera iteración.....	150

Figura 49 Ventana de definición del modelo de trabazón de agregados considerado en el análisis de esfuerzos	152
Figura 50 Panel de configuración del mallado para el análisis de esfuerzos actuantes en las losas	153
Figura 51 Evaluación en la primera iteración en la losa cargada en esquina con eje tridem. Representación cromática.....	154
Figura 52 Vista de los desplazamientos sufridos por la losa según las condiciones de carga impuestas.....	154
Figura 53 Presentación de resultados para esfuerzos obtenidos en losa	156
Figura 54 Datos generales.....	160
Figura 55 datos de precipitaciones	161
Figura 56 Datos de diseño	162
Figura 57 Diseño de mezcla	162
Figura 58 diseño constructivo	163
Figura 59 Condiciones climaticas (Temperaturas horarias).....	163
Figura 60 Análisis a edad temprana (72horas)	164
Figura 61 Parametros de desempeño.....	165
Figura 62 diseño de dovelas y barras de amare	165
Figura 63 Esal's de diseño	166
Figura 64 Espectro de carga del eje simple	166
Figura 65 Espectro de carga del eje tándem	167
Figura 66 Espectro de carga de eje Tridem.....	167
Figura 67 Tasa de crecimiento anual de 3%.....	168
Figura 68 Analisis de deterioro: Escalonamiento	168
Figura 69 Análisis de deterioro: Agrietamiento transversal	169
Figura 70 analisis de deterioro: agrietamiento longitudinal	169
Figura 71 Analisis de deterioros IRI	170
Figura 72 Analisis de deterioro :Escalonamiento	172
Figura 73 Análisis de deterioro: Agrietamiento transversal.....	173

Figura 74 Análisis de deterioros: Agrietamiento Longitudinal	173
Figura 75 Analisis de deterioros :IRI	174
Figura 76 Analisis de Deterioro: Escalonamiento	179
Figura 77 Análisis de deterioro: Agrietamiento transversal.....	180
Figura 78 análisis de deterioro: Agrietamiento longitudinal.....	180
Figura 79 Analisis de deterioros IRI	181
Figura 80 Analisis de deterioros: Escalonamiento	186
Figura 81 Análisis de deterioros: Agrietamiento transversal	186
Figura 82 Análisis de deterioro: Agrietamiento longitudinal	187
Figura 83 Analisis de deterioro: IRI	187

CAPITULO I: GENERALIDADES

INTRODUCCION

Tradicionalmente, para el desarrollo de estructuras de pavimentos de concreto hidráulico, se ha utilizado en nuestro país la guía AASHTO 93, la cual procede de enfoques empíricos, dando como resultado diseños de pavimentos técnicamente factibles de calcular y construir.

Idealmente, las técnicas mecanicistas de diseño conciben un mayor nivel de refinamiento en métodos analíticos. No obstante, este enfoque puramente mecanicista, se encuentra hoy día a nivel teórico, habiendo mucha información por procesar y necesidad de profundizar las investigaciones en esta fase del diseño de una estructura de pavimento de concreto hidráulico.

Los métodos o procedimientos mecanicistas de diseño permiten relacionar los cálculos analíticos con el comportamiento del pavimento. Sin embargo, existen un número de factores importantes que no son adecuadamente modelados con técnicas mecanicistas, por lo cual el procedimiento mecanicista requiere adecuar con información empírica. Este ajuste al procedimiento da origen al método Mecanicista-Empírico, también denominado “racional”.

En nuestro país, fuera del método empírico AASHTO 93, los métodos mecanicista empírico no son utilizados por el poco conocimiento e investigación acerca de dichos métodos. Si bien se conoce la existencia de la guía AASHTO MEPDG (2002) por sus siglas en inglés (Mechanistic – Empirical Pavement

Desing Guide), desarrollada en EE.UU en la cual se involucran variables propias a la región en la cual se desarrolló el método, lo que hace que la utilización de dicha guía y su software no sea posible de utilizar en lugares donde las condiciones son muy diferentes a aquellas para las cuales fue concebida.

Por ello, ésta investigación, está orientada hacia la realización de una alternativa de diseño de pavimentos de concreto hidráulico con metodología mecanicista empírica para nuestro país, pretendiéndose así establecer criterios y definición de variables para su empleo en procesos de diseños de pavimentos de concreto de El Salvador y la comparación con los diseños de pavimentos de concreto obtenidos utilizando el método tradicional AASHTO 93.

ANTECEDENTES

La disponibilidad de infraestructura vial idónea es de alta relevancia para el desarrollo de cualquier nación, dado que repercute de manera sustancial a la conectividad de las estructuras productivas dispersas geográficamente dentro un país y sus socios comerciales vecinos.

Por ello, no cabe duda que la ingeniería de pavimentos se debate en la actualidad ante la cambiante necesidad de mejorar los procedimientos de diseño de pavimentos, con el objetivo de lograr mejores desempeños de esas estructuras que permitan una optimización de los costos de mantenimiento y rehabilitación asociados y, sobre todo, de los costos de operación de los usuarios de los pavimentos.

Así, con el transcurso de los años, las estructuras de pavimentos se han ido diseñando en consonancia con los avances aportados por las investigaciones de campo y laboratorio efectuadas en la ingeniería vial. Esto hace que cada vez se requiera un mayor énfasis a las variables involucradas para el desarrollo de pavimentos, tal que éstos resulten funcionales, seguros y económicos.

Históricamente, los primeros métodos de dimensionamiento de pavimentos de concreto estaban basados exclusivamente en consideraciones de fatiga mecánica determinando mediante fórmulas matemáticas su espesor, de forma que las tensiones producidas por las cargas en el pavimento no den lugar a

fenómenos de fatiga. Sin embargo, dichos métodos no permitían tener en cuenta una serie de factores de gran influencia en la durabilidad del pavimento, erosionabilidad de la base, existencia o no de hombros de concreto o de pasadores en las juntas, etc. Para olvidar esas limitaciones empezaron a desarrollarse métodos empíricos, basados en el comportamiento del servicio de los pavimentos, de los que el más conocido es el desarrollado a partir de los resultados del ensayo AASHTO (American Association of State Highways and Transportation Officials), por sus siglas en inglés.

En consecuencia, a partir de 1940 se han empleado métodos analíticos para el cálculo de esfuerzos, deformaciones, y desplazamientos en los pavimentos. En el año de 1943, estos métodos analíticos fueron desarrollados para estructuras de dos capas y luego en 1945 se desarrolló para estructuras de tres capas.

En 1956 como consecuencia de la ayuda general para carreteras en Estados Unidos se produjo un gran plan de desarrollo del sistema de carreteras en este país. Parte de este plan fue un ambicioso programa de investigación científica y ensayo a escala real orientada a desarrollar una metodología empírica que permitiría diseñar estructuras de pavimentos que tengan importancia previsible y confiable durante todo su ciclo de vida.

Luego en el año de 1960 se desarrolla la llamada prueba AASHTO, que consistía en determinar relaciones significativas entre el comportamiento de varias secciones de pavimentos y las cargas aplicadas sobre ellas o bien para determinar las relaciones significativas entre un número de repeticiones de ejes con cargas, de diferente magnitud y disposición, y comportamiento de diferentes espesores de pavimentos conformados con bases y sub bases.

Aproximadamente un año después de terminar la prueba AASHTO, para el año de 1961, salió publicada la primer guía AASHTO para el diseño de pavimentos de concreto hidráulico y de concreto asfáltico. Posteriormente para el año de 1972 se realizó una revisión al método y se publicó como la guía de diseño AASHTO, para estructuras de pavimento 1972. Para 1981 se hizo una revisión a la guía de diseño específicamente para pavimentos de concreto con cemento portland. Para 1986 se publicó una revisión de la “Guía para el diseño de estructuras de pavimento”.

En 1993 se realizó una revisión del diseño de sobre carpetas de pavimento, dando como resultado correlaciones empíricas que al final constituyeron la guía de diseño de pavimento AASHTO 1993, la cual incluyó una cantidad limitada de secciones estructurales, en una sola localidad y con niveles de tráfico limitados, siendo esta guía la que se sigue utilizando en nuestro país (El Salvador). En el año de 1998 se publicó un método alternativo de diseño de pavimentos, que

corresponde a un “Suplemento a la guía de diseño de estructuras de pavimentos”.

Y luego entre los años 1998-2004, se realizó el Proyecto de Investigación 1-37A de la NCHRP (National Cooperative Highway Research Program). La investigación examinó la literatura relevante producida en Estados Unidos y del extranjero, además de conclusiones de investigaciones pasadas, prácticas de diseño vigentes, y bases de datos relacionadas con el análisis y el diseño de pavimentos surgiendo como resultado el desarrollo de una guía de diseño basada en principios mecanicistas sólidos, y un software computacional.

Así surgió la necesidad de analizar estos temas y desarrollar una nueva Guía para el Diseño de Estructuras de Pavimentos Nuevos y Rehabilitadas, con métodos basados en principios mecánicos empíricos, al igual que el software necesario para su aplicación generalizada en otros países. Ante esto, se publicó la versión actual de la guía de diseño, a la que se está denominando como Guía AASHTO MEPGD, que es producto de la investigación realizada que ha sido dada a conocer para que sea aprobada y evaluada por los usuarios interesados del sector público y privado de los EE.UU.

Posteriormente, en América Latina, países como Argentina, Chile, Colombia Costa Rica, México entre otros han tratado de llevar a cabo diseños de estructuras de pavimento creando alternativas del método mecanicista

empírico, realizando correlaciones y llegando a puntos intermedios entre el método Mecánico-Empírico AASHTO 2002 y el método empírico AASHTO 1993, siendo algunos países de Sur América los primeros en adaptar dicha metodología para pavimentos de concreto hidráulico y en países como México y Costa Rica esta metodología es utilizada solo para pavimentos flexibles.

En El Salvador aún se diseña con el método AASHTO 1993, ya que no se cuenta con mayores logros de investigación en el ramo, y éste ha ofrecido diseños de pavimentos técnica y constructivamente desarrollables. Pero dado que en la región existe en boga la aplicación de técnicas más actuales y adaptables a las condiciones propias de cada país, se pretende desarrollar una alternativa de diseño de estructuras de pavimentos con el método Mecánica - Empírico, para El Salvador, enfocado directamente en pavimentos de concreto hidráulico, utilizando los hallazgos mencionados anteriormente en los países de Latinoamérica pero adaptando las condiciones propias de nuestro país y así evolucionar en materia de ingeniería de caminos junto a los países que ya emplean la metodología Mecanicista - Empírica

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente, para la realización de diseños de pavimentos, se utilizan metodologías básicamente empíricas, en donde el diseño se propone a partir de propiedades físicas de los materiales y algún índice de resistencia, de acuerdo a la Guía AASHTO 1993 y en algunos casos incluyendo para el diseño el suplemento de 1998 de la guía AASHTO

Actualmente, los principios mecanicistas para diseño de pavimentos, (que posibiliten el análisis completo de la mecánica del comportamiento de un pavimento, ante las acciones del clima y del tránsito vehicular), son teorías de gran complejidad y requieren un componente científico de alto nivel para su pleno desarrollo.

Debido a que el diseño de estructuras de pavimentos se encuentra en continua evolución, y considerando lo expuesto anteriormente, existe tendencia hacia las metodologías de naturaleza Mecanicista-Empíricas, donde es posible combinar aspectos tanto empíricos como mecanicistas de tal manera que se logre determinar la respuesta del pavimento ante situaciones “críticas” de cargas y clima, utilizando modelos matemáticos y el desarrollo de software.

Las técnicas de diseño de pavimentos han evolucionado en el mundo, tal que existe actualmente la guía AASHTO MEPDG, de enfoque empírico mecanicista. No obstante, se ha determinado la imposibilidad de su aplicación en

Latinoamérica dado que ésta guía se desarrolló para los EE.UU. donde por ejemplo, los climas y condiciones de tráfico no son similares a los existentes en nuestra región.

Los procedimientos Mecánico - Empírico de diseño de pavimentos en concreto hidráulico, tienen menor aplicación en el diseño de pavimentos, dado que tradicionalmente se ha regido por el método AASHTO 93 en casi todos los países de la región. En el caso de nuestro país, aún se generan los primeros acercamientos a las fuentes bibliográficas existentes para la comprensión de la base teórica para desarrollar un método técnica y factiblemente utilizable en El Salvador alternativo a AASHTO 93.

En cuestión de pavimentos rígidos, en Latinoamérica, el desarrollo de métodos Mecánico - Empíricos se encuentra fuertemente nutrido de los aportes y experiencias alcanzadas en varias escuelas de ingeniería vial de la región. Estos avances son significativamente importantes y constituyen un punto de partida para impulsar el desarrollo de alternativas de diseño Mecánico-Empíricas adaptables a nuestro país.

Este trabajo está enfocado a eso precisamente: A la creación de herramientas de diseño de estructuras de pavimento de concreto hidráulico con metodologías de carácter mecanicista-empírico ajustadas y aplicables a nuestro país, en torno

a todas las teorías afines ya concebidas. Por lo mismo, se requerirá de la utilización de modelos adaptados de las variables a introducir a la alternativa de diseño propuesta, de tal forma que se constituya ésta en pionera del diseño de pavimentos de concreto hidráulico con técnicas mecánico-empíricas en El Salvador

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL:

- Desarrollar una alternativa de diseño de estructuras de pavimentos de concreto hidráulico mediante la metodología Mecánica – Empírica, aplicada para El Salvador.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Diseñar una alternativa de diseño de estructuras de pavimento de concreto hidráulico mediante la metodología Mecanicista – Empírica, para El Salvador.
- Recopilar la base teórica existente en el país sobre las variables utilizables del método mecanicista
- Ajustar las variables que intervienen en el diseño de estructuras de pavimentos de concreto hidráulico según enfoque mecanicista empírico al desarrollo de una alternativa para El Salvador.
- Comparar el resultado de la alternativa con respecto a la guía para el diseño de estructuras de pavimentos AASHTO 1993 y su suplemento de 1998.

ALCANCES

- Para realizar el diseño de pavimentos de concreto hidráulico con la metodología Mecánica-Empírica, partiremos de las investigaciones realizadas a nivel internacional, para poder determinar las variables necesarias a utilizar en una alternativa de diseño en El Salvador.
- El diseño a realizar se hará a nivel de investigación.
- La alternativa de diseño de concreto hidráulico desarrollada será únicamente para pavimentos de concreto simple con juntas (con o sin pasadores de traspaso de cargas).
- La Alternativa desarrollada aplicara solo para el diseño de carreteras nuevas (pavimentos en apertura).

LIMITACIONES

- Nuestra investigación estará sustentada en fuentes internacionales, ya que en nuestro país no se cuenta con una investigación sobre el diseño para pavimentos de concreto hidráulico por medio del método mecanicista- empírico.
- La investigación estará limitada al tiempo en que se debe finalizar el trabajo de graduación, es decir se cuenta con un periodo corto de tiempo para su realización.

JUSTIFICACION

Las metodologías de diseño para pavimentos de concreto hidráulico, han ido evolucionando con el tiempo, dándonos alternativas para poder crear pavimentos seguros y muy resistentes. Con estas nuevas alternativas de diseño de pavimentos los parámetros a evaluar son más exigente, ya que no solo se toma en cuenta el diseño empírico, sino también el comportamiento mecánico de la estructura del pavimento, es por esto que la guía de diseño AASHTO MEPDG comenzó a tomar en cuenta estos factores que son muy importantes.

En El Salvador no se ha realizado una investigación completa de la metodología mecanicista-empírica, y se siguen utilizando métodos de diseño empíricos. Es por esta razón que se realizara esta investigación creando una alternativa de diseño usando el método Mecanicista - Empírico haciendo un ajuste con los datos de diseño, para que el resultado sea más apegado a las condiciones reales del país

**CAPITULO II: GENERALIDADES SOBRE
LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO
HIDRÁULICO**

2.1 Generalidades sobre los pavimentos de concreto hidráulico

2.1.1 Definición de pavimentos de concreto hidráulico

Pavimentos de Concreto Hidráulico.

Es un pavimento constituido por un conjunto de losas de concreto de cemento portland que se pueden construir directamente sobre la subrasante preparada o sobre una capa intermedia de apoyo (base o Subbase), elaborada con materiales granulares o estabilizado.

Dada su naturaleza rígida la mayoría de las cargas vehiculares son absorbidas por la losa de concreto hidráulico, por lo que son necesarias menos capas en la estructura de pavimento.

La estructura de pavimento por lo general está compuesta por una capa subrasante, subbase y la capa de rodadura, pero en algunos casos cuando el diseñador determine conveniente se puede colocar una capa de base.

Los diversos tipos de pavimentos de concreto pueden ser clasificados, en orden de menor a mayor costo inicial, de la siguiente manera:

- Pavimentos de concreto simple
 - Sin elementos de transferencia de carga.

- Con elementos de transferencia de carga
- Pavimentos de concreto con refuerzo de acero y elementos de transferencia de carga
 - Con refuerzo de acero no estructural (refuerzo secundario)
 - Con refuerzo de acero estructural
- Pavimentos con refuerzo continuo
- Pavimentos de concreto pretensado o post tensado
- Pavimentos de concreto reforzado con fibras.

2.1.2 Estructura de los pavimentos de concreto hidráulico

Los diferentes métodos de diseño, como AASHTO 93, 98 y PCA 84, considera al menos las siguientes capas para el diseño estructural de los pavimentos de concreto hidráulico:

- Subrasante
- Subbase o base
- Capa de Rodadura (concreto hidráulico)

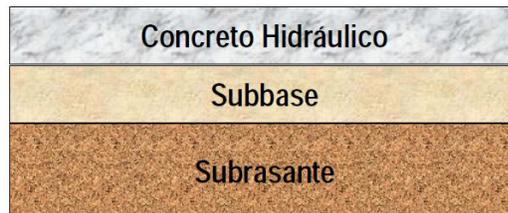


Figura 1 Estructura de un pavimento rígido

2.1.2.1 Subrasante

La subrasante es la superficie terminada de la carretera a nivel de suelo natural, el cual puede ser un corte o un relleno, la cual sirve como fundación para todo el paquete estructural de un pavimento.

El espesor del pavimento dependerá en gran parte de la calidad de la subrasante, por lo que esta debe cumplir con los requisitos de resistencia, incompresibilidad e inmunidad a la expansión y contracción por efectos de la humedad, por consiguiente el diseño de un pavimento es esencialmente el ajuste de la carga de diseño por rueda a la capacidad de la subrasante.

a) Materiales

Estos deben estar libre de vegetación y materia orgánica, de lo contrario, el material deberá reemplazarse por material adecuado o considerar la estabilización de los suelos subyacentes. Los materiales apropiados para capa de subrasante, son los suelos de preferencia granulares con porcentajes de

hinchamiento según ensayos AASHTO T-193. Según la AASHTO M-145 los suelos clasificados A-8, son materiales inadecuados, ya que son orgánicos constituidos por materiales vegetales o fangosos; cuando en la subrasante aparezcan áreas con este tipo de material deberá remplazarse por otro que llene los requisitos para subrasante removiendo primero el material inapropiado.

b) Compactación

Para compactarse la capa de subrasante el espesor de esta debe escarificarse, homogenizarse, mezclarse, conformarse y compactarse en su totalidad, hasta lograr la densidad máxima según lo determine la especificación técnica. (AASHTO T-180, AASHTO T-134 o AASHTO T-99).

2.1.2.2 Subbase o base

Esta es la capa que esta entre la subrasante y la capa de rodadura y está destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas aplicadas a la superficie de rodadura de pavimento, de tal manera que la capa de subrasante la pueda soportar absorbiendo las variaciones inherentes a dicho suelo que puedan afectar a la Subbase. La Subbase debe de controlar los cambios de volumen y elasticidad que serían dañinos para el pavimento.

Se utiliza además como capa de drenaje y controlador de ascensión capilar de agua, protegiendo así a la estructura de pavimento, por lo que generalmente se usan materiales granulares.

a) Materiales

El material de Subbase debe ser seleccionado y tener mayor valor de soporte de California (CBR) que el material de subrasante y su espesor será variable por tramos, dependiendo de las condiciones y características de los suelos existentes en la subrasante.

Los materiales de Subbase deben ser suelos del tipo granular que llenen los siguientes requisitos:

- i. El valor de soporte de California (CBR) debe determinarse según AASHTO T-193 sobre muestra saturada según AASHTO T-180.
- ii. El tamaño de las piedras que contenga el material de Subbase no debe ser mayor de $\frac{2}{3}$ del espesor de esta y los porcentajes que pasan los tamices No. 40 y No. 200, deben ser según AASHTO T-11 y T-27.
- iii. El índice de plasticidad debe determinarse según AASHTO T-90, y el límite líquido según AASHTO T-89, determinados ambos sobre una muestra preparada en húmedo, según AASHTO T-146.
- iv. El equivalente de arena es determinado por el método AASHTO T-176.

- v. El material debe estar libre de impurezas tales como: basura, materia orgánica, terrones de arcilla y cualquier otro material que pueda ocasionar problemas específicos al pavimento.

b) Compactación

El material de Subbase debe ser tendido en capas no mayores de 20 centímetros de espesor. Este debe homogenizarse y conformarse, agregándole la cantidad de agua que sea necesaria para lograr la compactación en su totalidad, hasta alcanzar su densidad máxima por el método AASHTO T-180.

Existen 3 tipos de bases que se pueden utilizar en el diseño de los pavimentos y estas son:

- Base granular
- Base estabilizada con suelo cemento
- Base estabilizadas con asfalto (bases negras)

Base Granular:

Material constituido por piedra de buena calidad, triturada y mezclada con material de relleno o bien por una combinación de piedra o grava, con arena y suelo, en su estado natural. Todos estos materiales deben ser clasificados para formar una base integrante de la estructura de pavimento. Su estabilidad dependerá de la graduación de las partículas, su forma, densidad relativa, fricción interna y cohesión, y todas estas propiedades dependerán de la proporción de finos con respecto al agregado grueso.

Antes de tener el material de base, el material de Subbase debe tener la compactación especificada. Cuando el espesor de base sea mayor de 20 centímetros, se tendrá que hacer la compactación por capas, siempre que estas no sean mayores de 20 ni menores de 10 centímetros. Además, se tiene que humedecer la superficie entre capas, para conseguir una mejor adhesión entre estas y así evitar deslizamientos.

Requisitos generales

- Espesor mínimo= 10 cm.
- Tamaño máximo $<1/3$ del Espesor
- P200<15%
- Desgaste Los Ángeles <50%
- Índice de plasticidad no mayor de 10%
- Limite liquido no mayor de 40%
- Equivalente de arena mayor de 25%
- Valor de soporte de California (CBR) a densidad máxima y humedad optima, mayor de 25%

Recomendaciones

- No emplear capas mayores de 20 cm

- Deberá especificarse una densidad mínima del 98% del T-180

Base estabilizada con materiales cementantes

Corresponde a la mezcla de suelo, con cemento la cual es compactada por medios mecánicos. Entre las ventajas que ofrece este tipo de base es el aprovechamiento de los materiales locales, también ayuda al incremento de la resistencia a la erosión, evita la consolidación por cargas y mejora su transferencia dando como resultado menores deflexiones e incremento de la rigidez de apoyo

Entre algunas características de las bases estabilizadas con cemento tenemos:

- Espesor mínimo: 10 cm.
- Tipo de suelo recomendado para tránsito pesado: A1, A2-4, A2-5 y A3
- Tamaño máximo: 75 mm.
- Contenidos de cemento: de 2% a 5%
- Resistencia a Compresión de 2,1 a 5,5 MPa. (21-55 Kg/cm²)
- Resistencia a Flexión de 0,7 MPa a 1,4 MPa. (7-14 Kg/cm²)
- Módulo de elasticidad: 600.000 a 1.000.000 psi (de 4100 a 6900 MPa).

Base estabilizada con asfalto

Es la combinación de suelos con asfalto, mejora las condiciones de estabilidad y resistencia a la humedad, proporcionando mejor distribución de las cargas

ocasionadas por el tránsito a las capas subyacentes de la estructura del pavimento.

La mezcla debe ser uniformemente compactada, hasta lograr la densidad máxima. En caso que el espesor de la base estabilizada con material bituminoso fuera mayor de 15 centímetros, la mezcla debe ser tendida y compactada en dos o más capas.

2.1.2.3 Capa de rodadura

Es la capa superior de la estructura de pavimento, construida con concreto hidráulico, por lo que debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad, basan su capacidad portante en la losa, más que en la capacidad de la subrasante. En general, se puede indicar que el concreto hidráulico distribuye mejor las cargas hacia la estructura del pavimento.

Al incrementar el espesor de la losa de concreto, se incrementa la capacidad de soporte de esta.

La losa puede ser de concreto hidráulico simple o con acero de refuerzo continuo. Si son de concreto simple, estas se construirán con o sin dispositivos de transferencia de carga.

La losa de concreto hidráulico es muy susceptible a los efectos de la expansión y contracción generados por los cambios de temperatura. Suele requerirse de

extrema precaución y control de conservación en el sellado de juntas para evitar problemas posteriores

Algunas propiedades físicas y mecánicas que deben cumplir los pavimentos de concreto hidráulico son:

- La determinación de la resistencia media a flexión a 28 días (in situ).
- Se recomienda evaluar en laboratorio la relación flexión- compresión del concreto hidráulico con los agregados a emplear.
- Comúnmente se emplean MR a 28 días entre 4,0 MPa (40 Kg/cm²) y 5,0 MPa (50 Kg/cm²).
- Evitar el empleo de concretos hidráulicos con elevada resistencia. Se recomienda diseñar con una resistencia media a flexión a 28 días del orden de 4,5 MPa (45 Kg/cm²)
- Al menos una de las fracciones de agregados gruesos debe encontrarse triturada.
- Evitar el empleo de agregados de elevado coeficiente de expansión térmica.
- Evitar el empleo de agregados de elevado módulo de elasticidad

El uso del pavimento de concreto hidráulico se ha ido incrementando con los años ya que tiene diversas ventajas como su periodo de duración que puede oscilar entre 20 a 30 años teniendo un deterioro mínimo durante su vida útil, y por lo

tanto se utiliza un mantenimiento mínimo. La deformación en la superficie es mínima y esto hace que el índice de servicio sea alto durante su vida útil.

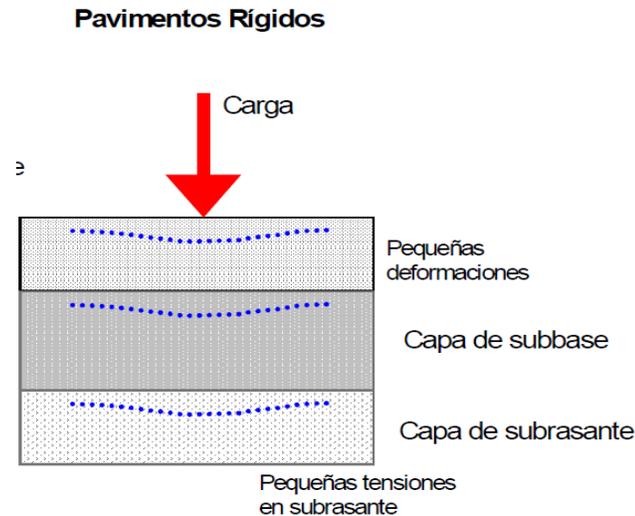


Figura 2 Distribución de cargas en el pavimento rígido

Juntas transversales y longitudinales.

Para los pavimentos de concreto hidráulico, Es necesario controlar la fisuración en la losa y permitir el movimiento relativo entre las capas adyacentes.

Las juntas son longitudinales y transversales y tienen el rol de inducir fisuras por contracción del concreto, para proveer una transferencia de carga adecuada, prevenir las infiltraciones de agua y permitir el libre movimiento de la losa contra estructuras fijas.

Los efectos de retracción y de gradientes térmicos en las losas de concreto producen inevitablemente fisuramiento, que solo podemos controlar o dirigir, precisamente, por medio de las juntas.

Existen 4 tipos de juntas las cuales nombraremos a continuación:

- De dilatación
- De construcción longitudinal
- De retracción - flexión
- De construcción transversal

Barras de amarre

Son barras de acero corrugadas que controlan el movimiento lateral de los carriles, las mismas que sirven de anclaje.

2.2 MÉTODO DE DISEÑO PARA PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO

Diseño de pavimentos:

Es el proceso por medio del cual se determinan los componentes estructurales de un segmento vial, teniendo en cuenta la naturaleza de la subrasante, los materiales disponibles, la composición del tránsito y las condiciones del entorno.

Métodos de diseño

En función del tipo de análisis que realizan, las metodologías de diseño estructural se dividen en:

- Empíricas: se basa en la performance evidenciada en experiencias y/o experimentos de pavimentos. Este tipo de aproximaciones son comunes, desde las muy simples (empleo de soluciones conocidas) a las muy complejas (AASHTO '93).
- Mecanicistas: Es una aproximación puramente científica, basada a partir del mecanismo de respuesta estructural del pavimento cuando es solicitado por cargas. Dado lo complejo que resulta el comportamiento de los pavimentos, no existen metodologías netamente empíricas.
- Empírico- mecanicistas: Combinan aspectos de ambas metodologías (ej. Método PCA 1984, ACPA StreetPave).

2.2.1 MÉTODOS EMPÍRICOS

2.2.1.1 MÉTODO AASHTO 1993.

El método de diseño para estructuras de pavimento que propone la AASHTO en la edición de 1993, se basa principalmente en la información y en los datos empíricos obtenidos de la prueba realizada alrededor de un circuito por la AASHO Road Test, llevada a cabo durante el periodo de 1958 a 1960 en Ottawa Illinois.

El objetivo principal de esta prueba fue determinar relaciones significativas entre el comportamiento de varias secciones de pavimento y las cargas aplicadas sobre ellas que pudiesen ser usadas en el desarrollo de criterios y procedimientos de diseño de pavimentos.

Circuitos de prueba de AASHO Road Test.

Las pruebas de tráfico consistían en la circulación de vehículos con diferentes configuraciones de ejes simples y tándem, los cuales eran conducidos por las pistas de pruebas. Diez combinaciones de diferentes cargas y ejes fueron utilizados, con cargas de ejes simple que variaban de las 2,000lb a las 30,000 lb y con cargas de ejes tándem que variaban de las 24,000 lb a las 48,000 lb. Luego se recopiló la información relacionada con la condición del pavimento con respecto a la presencia de grietas y la cantidad de recarpeteos necesarios para mantener la sección de pavimento en servicio. Los perfiles longitudinales y transversales también fueron obtenidos para determinar la extensión de baches, deformación de la superficie causada por la carga de los vehículos circulando a velocidades muy bajas, esfuerzos impuestos en la subrasante y la distribución de temperatura en las capas del pavimento. Toda esta información fue minuciosamente analizada, y los resultados formaron la base para la publicación de la guía interina para el diseño de estructuras de pavimento de la AASHO de 1961.

La primera guía de diseño de pavimentos de la AASHO fue editada en 1961 y 1962, la cual a su vez fue evaluada y revisada por el Comité de Diseño AASHTO en 1972, publicando la “AASHTO Interim Guide of Pavement Structures” la cual incorporó experiencias que fueron acumuladas desde la primera edición de la Guía de 1962, y en 1981 se revisó parte de la guía correspondiente al diseño de pavimentos rígidos, (capítulo III). [AASHTO, 1993, P: II-3]. Entre 1984y 1985, el Subcomité en Prácticas de Diseño de Pavimentos y consultores revisaron la guía en vigencia, dando como resultado la “AASHTO Guide for the Design of Pavements Structures” (1986).

En 1993 se publicó una nueva versión de la guía AASHTO, la cual incorpora la revisión del diseño de sobrecapas, diseño de subbase delgadas, erosión de la subbase y confinamiento lateral, así como también se extendieron las extrapolaciones de las cargas de tráfico de ejes simples hasta 50,000 lb y en ejes tándem y tridem hasta 90,000 lb, también a la ecuación general de diseño de la guía se le agregaron algunos factores tales como: el error estándar combinado, la diferencia de serviciabilidad y el coeficiente de drenaje.

La publicación de la AASHTO edición 1998 es una guía suplementaria de la guía para diseño de pavimentos proporcionado por la AASHTO de la edición 1993; contiene un procedimiento alternativo para diseño de pavimentos rígidos y diseño de juntas, correspondientes a las secciones 3.2 y 3.3 de la parte II de la edición 1993. En esta edición de la guía se incorporan factores como la relación de

Poisson, características de la subbase, condiciones climáticas de la zona y cambios en la determinación del módulo de reacción de la subrasante, (K), así como también un procedimiento para verificar la aparición de fallas en las juntas, como el escalonamiento de las losas del pavimento.

En el año 2004 la AASHTO publicó la guía Mecanicista-Empírica edición 2002, la cual incorpora entre otros las propiedades significativas del comportamiento de los materiales en el procedimiento de diseño, esta guía supera algunas de las deficiencias que tenían las anteriores publicaciones de la guía AASHTO con lo que respecta a: El incremento del tráfico y su caracterización (configuración de ejes, tipo y presión de neumáticos); deficiencias climáticas; deficiencias de construcción; deficiencias de desempeño (falla de juntas, grietas por temperatura, etc.); deficiencias de confiabilidad, en la actualidad se diseña para cantidades de tráfico mucho mayores a las décadas anteriores, por lo que al multiplicarlos por valores grandes, como los que resultan de los procedimientos de ediciones previas, los espesores de los pavimentos resultarían sobre diseñados.

Esta guía también incluye tecnología que considera directamente el comportamiento de los materiales a usar durante la vida útil y una relación directa entre construcción y especificaciones de los materiales y estructura de pavimento.

FACTORES DE DISEÑO DEL MÉTODO AASHTO 1993.

Las variables que intervienen para el diseño de pavimentos rígidos son tomadas en base a un cúmulo empírico de conocimientos, por lo que es importante conocer y entender las consideraciones concernientes a cada una de ellas.

VARIABLES INVOLUCRADAS EN EL DISEÑO DE ESPESORES DE LOSA DE PAVIMENTOS RÍGIDOS

a) Espesor. (D)

Es la variable que se pretende determinar al realizar un diseño de una estructura de pavimento, el espesor se refiere solamente a la capa de concreto hidráulico que se coloca sobre la subbase y/o subrasante.

b) Tráfico.

El tráfico es una de las variables más significativas del diseño de pavimentos, y una de las que más incertidumbre presenta al momento de estimarse; su determinación usualmente se basa en tasas de crecimiento vehicular, las cuales no son muy precisas. La mayoría de los métodos de diseño consideran esta incerteza, y la guía AASHTO 1993 propone el uso de niveles de confiabilidad, los cuales toman en cuenta estas incertezas en la predicción de las cargas del tráfico y su comportamiento. El tráfico se debe de convertir a ESAL's por medio de la multiplicación de varios factores, tal como lo define la guía AASHTO en el

apéndice D. El factor de eje equivalente convierte los pesos según cada eje de los vehículos a pesos normalizados de 18 kips, considerando el daño que puede causar cada eje en relación al daño que causa el paso de un eje estándar.

c) Coeficiente de confiabilidad. (R)

Es la probabilidad que la serviciabilidad o desempeño de la vía se mantenga en niveles adecuados para las cargas del tráfico y condiciones ambientales, así como también se mantenga en niveles adecuados desde el punto de vista del usuario durante todo el periodo de diseño.

La confiabilidad depende de diversas circunstancias que intervienen en su selección, como lo es la incertidumbre del volumen del tráfico en los incrementos que pudiesen surgir en el periodo para el cual se diseñe una vía. La confiabilidad es la variable en la cual se introduce un grado de certidumbre en el diseño y un nivel de seguridad o factor de seguridad (FR) para que el pavimento resista las cargas del tráfico en el periodo de diseño. El factor de seguridad (FR) depende del nivel de confiabilidad (R) y del error estándar combinado (So)

El error estándar combinado (So) depende de las condiciones locales y de los demás factores que afectan el comportamiento de un pavimento; entre dichos factores podemos mencionar: incertidumbre en el modelo, tránsito, medio ambiente, materiales de construcción, entre otros.

d) Módulo de reacción de la subrasante–subbase. (k)

El módulo de reacción de la subrasante-subbase, es una constante elástica que define la rigidez del material o resistencia a la deformación. Es la relación entre carga por unidad de área de superficie horizontal del suelo con el asentamiento correspondiente de la superficie; este parámetro representa la capacidad portante que posee un suelo en estado natural o con la combinación de una subbase, siendo éste el que servirá para colocar la estructura de pavimento.

Lo anterior lo propuso Weestergaard en 1926 al suponer que la subrasante-subbase no admite esfuerzos de corte y la reacción de la subrasante sobre la losa es igual a la deflexión de la subrasante multiplicada por una constante (K), la cual es el módulo de reacción de la subrasante-subbase.

e) Pérdida de serviciabilidad. ($\Delta PSI = P_0 - P_t$)

La serviciabilidad se define como la capacidad del pavimento de desempeñarse adecuadamente ante todo tipo de tráfico que circula en la vía, se mide en una escala del 0 al 5, en donde 0 (cero) significa pavimento intransitable y 5 significa pavimento en excelentes condiciones. [AASHTO, 1993, p: II-10]. Este factor es una medida subjetiva de la calificación del pavimento; sin embargo, la tendencia es definirla usando parámetros como el índice de regularidad internacional (IRI).

La serviciabilidad inicial (P_0) es la condición de un pavimento inmediatamente después de la construcción de éste. La guía AASHTO recomienda para pavimentos rígidos un $P_0 = 4.5$, mediante el uso de adecuadas técnicas de construcción. La serviciabilidad final (P_t) es la capacidad funcional que se espera tenga un pavimento al final del periodo de diseño. La AASHTO sugiere que para carreteras principales se utilice un valor de $P_t = 2.5$ o 3.0 y para carreteras de bajo nivel un valor de serviciabilidad final de 2.0 .

El cambio total en el índice de serviciabilidad (ΔPSI) viene dado por:

$$\Delta PSI = P_0 - P_t$$

f) Propiedades del concreto. (Módulo de elasticidad y módulo de ruptura)

Módulo de ruptura (MR).

Para la metodología presentada se emplea el módulo de ruptura (MR) a 28 días. El valor a asignar en el diseño depende de las posibilidades que existan en la zona de construcción del pavimento, para producir hormigones de cierta calidad. Ante esto se deberán considerar los valores siguientes.

Módulo de ruptura (MPa)

TIPO DE VIA	Sc´
Expresa	5.0
Troncal	5.0
Colectora	5.0

Tabla 1 Valores de flexotracción según tipo de vía

Módulo de Elasticidad y Coeficiente de fricción de la base.

El tipo de base puede influir sobre el comportamiento de los pavimentos de hormigón, ya que afecta directamente en las condiciones de soporte de la losa.

Por otra parte, el coeficiente de fricción es el parámetro que pretende cuantificar la resistencia que se presenta al deslizamiento entre la base y la losa.

El Módulo de elasticidad de la base (E_b) depende del tipo de base utilizada y su valor puede ser obtenido de la tabla siguiente.

Tipo de material de base	Módulos de elasticidad (MPa)	Coeficiente de Fricción		
		Bajo	Medio	Alto
Suelo Fino	20.2-275.6	0.5	1.3	2.0
Arena	68.9-172.7	0.5	0.8	1.0
Granular	103.4-310.1	0.7	1.4	2.0

Tabla 2 Valores de coeficiente de fricción según material de base empleada

g) Coeficiente de transferencia de carga. (J)

El coeficiente J representa la eficiencia de transferencia de carga que tiene una losa del pavimento al transmitir fuerzas cortantes a las losas adyacentes, esto tiene por objeto minimizar las deformaciones y los esfuerzos en la estructura del pavimento. La transferencia de carga comúnmente se da por medio de barras de acero lisas incrustadas en las losas en las juntas transversales, aunque puede haber otros tipos de mecanismos de transferencia de carga, como la transferencia a partir de la trabazón de agregados.

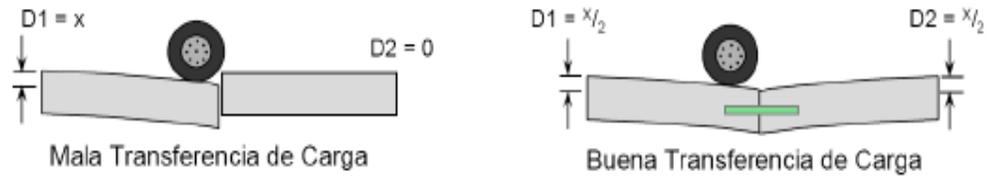


Figura 3 Transferencia de cargas entre losas

El esquema mostrado ilustra la transferencia de carga entre losas vecinas. Adaptado del Instituto del cemento portland argentino ICPA, presentación de diseño de pavimentos rígidos. Ing. Diego H. Calo [2008: P.25]

h) Coeficiente de drenaje. (Cd)

El coeficiente de drenaje fue incorporado en la guía AASHTO para diseño de pavimentos rígidos a raíz de los efectos del drenaje en el desempeño de la estructura de pavimento, tales como el efecto de la humedad en la resistencia de la subrasante y en la erosionabilidad de la subbase.

La clasificación que se ha asignado a la calidad del drenaje se presenta a continuación:

Calidad del drenaje	Agua removida del interior*
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Regular	1 semana
Pobre	1 mes
Muy Pobre	El agua no es drenada

*Basado en el tiempo de drenaje, es decir, el 50% drenado (tiempo requerido para drenar el 50% del agua drenable).

Tabla 3 Clasificación de la calidad del drenaje de materiales de base y subrasante

También se presenta la tabla de los coeficientes de drenaje para materiales de subrasante

Drenaje longitudinal	Clima	Subrasante gradación fina		Subrasante gradación gruesa	
		Base No-permeable	Base Permeable	Base No-permeable	Base Permeable
No	Húmedo	0.70 – 0.90	0.85 - 0.95	0.75 – 0.95	0.90 – 1.00
No	Seco	0.90 – 1.10	0.95 – 1.05	0.90 – 1.15	1.00 – 1.10
Si	Húmedo	0.75 – 0.95	1.00 – 1.10	0.90 – 1.10	1-05 – 1.15
Si	Seco	0.95 – 1.15	1.10 - 1.20	1.10 – 1.20	1.15 – 1.20

Tabla 4 Coeficiente de drenaje para materiales de subrasante

i) Desviación Estándar combinada de parámetros y comportamiento

Una desviación estándar es seleccionada tal que represente las condiciones locales.

Los valores de S_0 desarrollados en la prueba de camino AASHO no incluyeron error del tránsito. Sin embargo, el error de la predicción desarrollado en la prueba correspondió a una desviación estándar total para el tránsito de 0.35 para pavimentos rígidos.

2.2.2 Métodos mecanicistas-empíricos

Estos procedimientos de diseño estructural de capas de pavimento se basan en el análisis mecanístico para escoger una combinación de espesores y materiales con el fin de suministrar el nivel de servicio deseado de acuerdo con el tránsito

esperado. Los elementos del procedimiento de diseño mecánico abarcan además los efectos climáticos, el modelo estructural y la respuesta del pavimento, la caracterización de los materiales, las funciones de transferencia y el análisis del comportamiento para concluir con el proceso de selección del sistema de pavimento a construir. La Figura 2.4 muestra el procedimiento de este método diseño estructural.

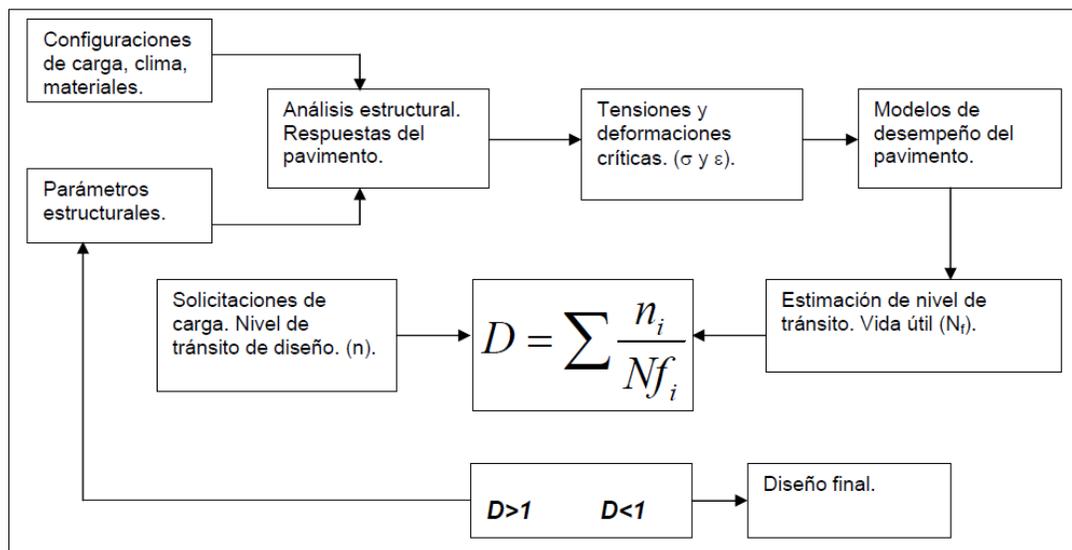


Figura 4 Proceso de diseño Mecanicista-Empírico

El modelo mecánico se basa en la teoría de multicapa elástica o elemento finito y determina las reacciones del pavimento a la carga de las ruedas en términos de esfuerzos, deformaciones unitarias y deflexiones (σ , ϵ , Δ). La parte empírica del diseño utiliza las reacciones del pavimento para predecir la vida del mismo basada en observaciones hechas en campo. Así, el término “empírico” se debe a la definición de las funciones de transferencia a partir de datos reales.

2.2.2.1 SUPLEMENTO AASHTO 1998

En el año de 1998 se realizó una revisión al método de AASHTO 1993, determinando la importancia de fortalecer el método de diseño para pavimentos, y es como se propone un método de diseño alternativo para pavimentos incluyendo en el diseño de pavimentos AASHTO 1993 el suplemento para diseño de pavimentos AASHTO 1998, que propone un método de diseño alternativo para pavimentos y en la actualidad es considerado el primer paso para la creación de un método de diseño mecanicista – empírico ya que incluye algunas variables que proponen algunas variables mecanicistas.

DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO AASHTO 1998

Ya que el método de diseño de la AASHTO 98 es un suplemento, algunas de sus variables son las mismas que la guía de diseño AASHTO 93, las cuales ya fueron definidas y por lo tanto solo las mencionaremos a continuación:

- El tránsito (W18).
- La subrasante, representada por el valor (k).
- La serviciabilidad inicial (p_i) y la serviciabilidad final (p_f).
- El modulo elástico de la base (E_{sb}).
- La confiabilidad (R), representada por el coeficiente de Student (Z_r).
- El coeficiente de drenaje (Cd).
- El módulo elástico del concreto hidráulico (E).

- La variabilidad, representada por la desviación normal (S_o).

Para el método de diseño AASHTO 98 las variables de diseño que se incluyen para realizar una estimación son las que se mencionan a continuación:

- El módulo de ruptura (MR).
- El Coeficiente de Poisson (μ).³
- El largo de la losa (L).
- El espesor de la base (H_a).
- El factor de ajuste por confinamiento (TB).
- El coeficiente de fricción losa base (f).
- Velocidad media anual del viento [nudos] (WIND).
- Temperatura media anual del ambiente, [°C] (TEMP).
- Precipitación media anual [mm] (PRECIP).
- Tipo de transferencia de carga (sin / con barras).

El procedimiento de diseño empleado, se resume a continuación en la figura siguiente, través del siguiente diagrama de flujo, para el diseño del espesor de losa.

EL procedimiento de diseño de espesor de losa se puede ilustrar así:

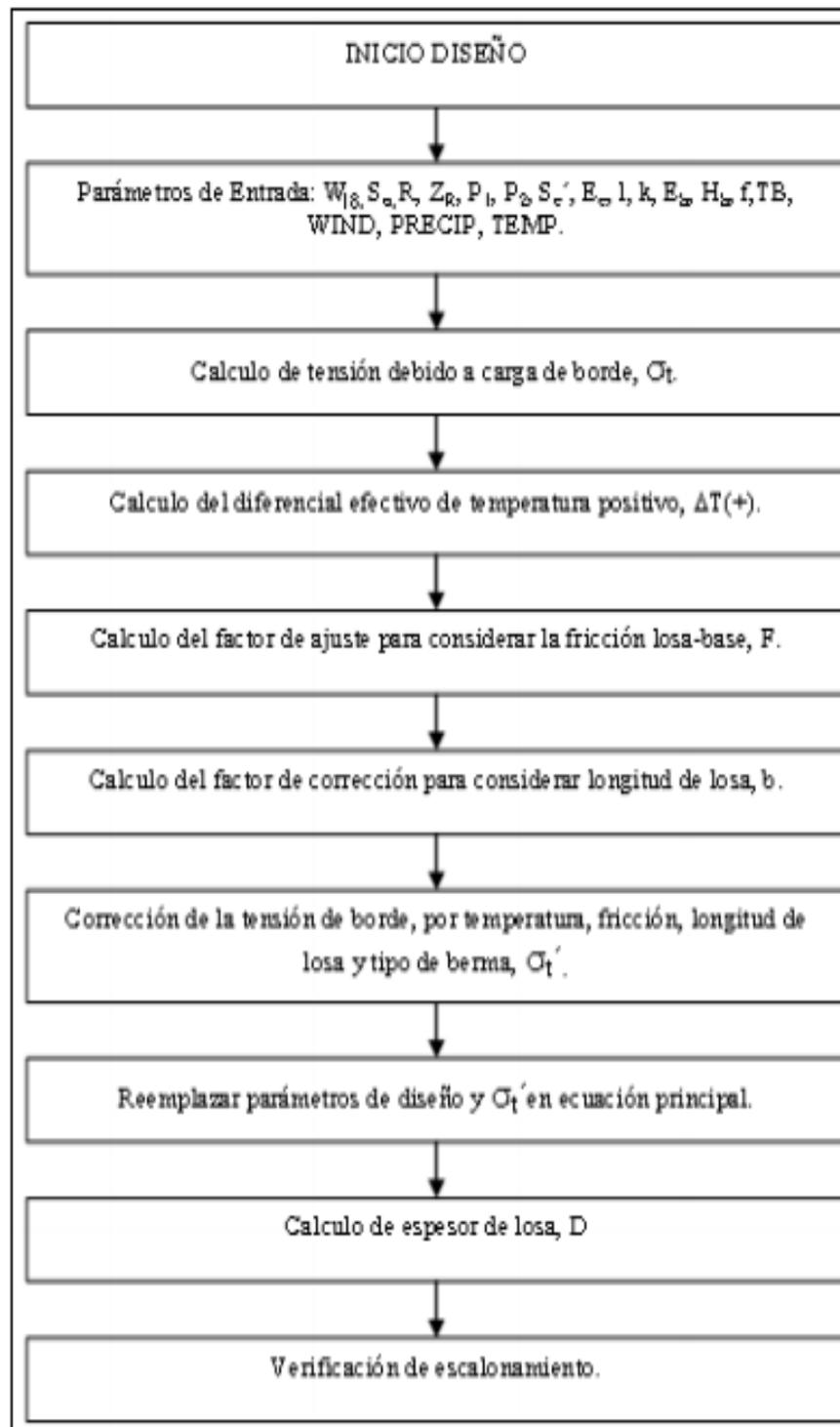


Figura 5 Procedimiento de diseño de espesor de losa mediante AASHTO 98

VARIABLES DE DISEÑO

Se detallará las nuevas variables de diseño de la guía AASHTO 98, que no han sido definidas, como lo son:

Clima.

Los parámetros directos del clima que afectan a un pavimento de hormigón son la temperatura y las precipitaciones. La temperatura se manifiesta principalmente en el comportamiento del pavimento por medio del alabeo que produce en las losas. Las precipitaciones se asocian al debilitamiento de la subrasante producto de la infiltración de agua a esta capa y además, es parte de los procesos de bombeo de finos.

De acuerdo a las recomendaciones del método AASHTO 1998, para considerar el efecto del alabeo por humedad y construcción, es recomendable utilizar la siguiente zonificación:

Precipitación media anual

Clima	Precipitación Media Anual (mm)
Seco	<762
Húmedo	≤762

Tabla 5 Precipitación media anual (Ejemplo)

Variabilidad.

La variabilidad se refiere fundamentalmente a las varianzas en las mediciones de los parámetros que se definen en el diseño, con respecto a los valores que se obtienen en terreno en forma real.

Cada una de estas variables pueden variar en un rango muy amplio, por esta razón es necesario conocer sus parámetros estadísticos asociados, para poder manejar estas variables en forma correcta.

Propiedades del Concreto Hidráulico.

a. Razón de Poisson.

La razón de Poisson se define como la razón entre la deformación unitaria lateral y la unitaria axial, causada por una carga en el sentido axial. Su valor puede obtenerse mediante un ensayo estático o dinámico determinando las deformaciones antes señaladas.

En la mayoría de los materiales tratados con cemento, su valor varía entre 0.10 y 0.25.

Para el caso de hormigones de características normales se recomienda emplear un valor de 0.15.

2.2.2.2 ECUACIONES DE WESTERGAARD

A principios de siglo XX, uno de los primeros investigadores que estudió los esfuerzos producidos por los efectos de las cargas de ruedas sobre pavimentos de concreto fue el Dr. H.M. Weestergaard, colocadas en la esquina, en el borde a cierta distancia de la esquina y en el centro de la losa, como conclusión de sus análisis teóricos y matemáticos, el Dr. Weestergaard dedujo formulas

semiempíricas para calcular el esfuerzo provocado por las cargas y además, otra fórmula para calcular el esfuerzo causado por diferencias de temperatura.

Las formulas del Dr. Weestergaard toman en cuenta el área de distribución de las cargas de ruedas sobre un círculo cuya área es equivalente al correspondiente de apoyo de las ruedas sobre el pavimento y además toma en cuenta la reacción de la capa subrasante (k).

La fórmula propuesta por el Dr. Weestergaard, para el caso crítico de esquina, es la siguiente:

$$S = \frac{3P}{h^2} \left[\frac{1 - (a\sqrt{2})^{0.6}}{L} \right]$$

Donde:

S= esfuerzo provocado en la losa por la carga P, en kg/cm²

P= carga aplicada en esquina de losa (kg)

h= espesor del pavimento

a =radio del círculo de área equivalente al área cargada, en cm

L= radio de rigidez relativa entre losa y subrasante, en cm, que vale:

$$L = \sqrt[4]{\frac{E h^3}{12 (1 - u^2) k}}$$

Donde:

E= módulo de elasticidad del concreto en kg/cm²

u = coeficiente de Poisson para el cortante, con un valor medio de 0.15

h = espesor del pavimento

k = módulo de reacción de la subrasante (kg/cm^3) que deberá aplicarse sobre un área circular (cuyo diámetro estará comprendido entre 15 y 76 cm) para producir un hundimiento de 1.27 cm posteriormente, el Dr. Gerald Pickett hizo algunos cambios para el cálculo de espesores a la fórmula propuesta por Westergaard en base a algunos ensayos experimentales realizados en EE. UU. La fórmula es la siguiente:

$$S = \frac{4.2 P}{h^2} \left[1 - \frac{\sqrt{(a/L)}}{0.925 + 0.22 (a/L)} \right]$$

Donde:

S = esfuerzo provocado en la losa por la carga P , en kg/cm^2

P = carga aplicada en esquina de losa (kg)

h = espesor del pavimento

a = radio del círculo de área equivalente al área cargada, en cm

L = radio de rigidez relativa entre losa y subrasante, en cm, que vale:

$$L = \sqrt[4]{\frac{E h^3}{12 (1 - u^2) k}}$$

2.2.2.3 MÉTODO DE DISEÑO DE LA PCA.

El método de diseño de la Portland Cement Association, es exclusivamente un método de diseño desarrollado para pavimentos de concreto hidráulico. Los aspectos indicados en éste apartado se basan principalmente en lo indicado en el manual de diseño de la PCA (Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements) edición 1984.

Antecedentes del método de la PCA.

En 1966 la PCA introdujo el primer procedimiento mecanístico - empírico para el diseño de espesores de pavimentos de concreto. 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 Westergaard y presentándolos en 6 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. Posteriormente la metodología de diseño fue mejorada a través de recomendaciones de investigadores como E. J. Yoder, G. Ray, R. Packard y B. Colley de la PCA, 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 1977 Darter y Barenberg desarrollaron un procedimiento de diseño para la Federal Highway Administration (FHWA) y Tayabji, Colley y Packard para la PCA en 1984, considerando además de la fatiga, los efectos de bombeo o “pumping”; con este procedimiento la PCA introdujo una nueva metodología de diseño en 1984 (la versión vigente del método), basado en un análisis de elemento finito, no solamente considerando fatiga sino que también considerando el criterio de erosión. Así mismo, la metodología permitió considerar el uso de dovelas en juntas y de elementos para dar apoyo lateral a la losa de concreto.

En general, el método de diseño de la PCA está basado en:

1. Análisis comprensivo de esfuerzos en el concreto y deflexiones en las juntas del pavimento, esquinas, y bordes, por un programa de computadora de elemento finito.
2. Modelos y pruebas a escala verdadera como la Arlington Test y varios proyectos de investigación dirigidos por la PCA y otras agencias acerca de sub-bases, juntas y hombros de concreto.
3. Pavimentos experimentales sujetos a pruebas de tráfico controlado, tales como la Bates Test Road, the Pittsburg Test Highway, the Maryland Road Test, the AASHO Road Test, y estudios de pavimentos de autopistas en servicio realizado por varios departamentos de estado de transporte.
4. El desempeño de pavimentos construidos normalmente sujetos a tráfico normal.

Criterios de diseño del método de la PCA.

El método de diseño de la PCA considera dos criterios de falla: el criterio de erosión de la sub-base por debajo de las losas y el criterio del esfuerzo de fatiga.

a) El criterio de erosión de la sub-base por debajo de las losas, 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.

b) El criterio del esfuerzo de fatiga, el cual reconoce que el pavimento pueda fallar debido a excesivas repeticiones de carga.

A continuación se indican los principales aspectos relacionados con cada uno de los criterios de falla antes referidos.

Erosión.

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 por efecto del bombeo. El bombeo es definido por la University of Washington of Civil and Environmental Engineering, (WSDOT Pavement Design), como “el movimiento de material por debajo de la losa de concreto o eyección de material desde abajo de la losa, como resultado de la presión del agua. El agua acumulada por debajo de la losa será presurizada cuando la losa flexione debido a carga”.

El bombeo ocurre debido a muchas repeticiones de cargas de ejes pesados en las esquinas de la losa de concreto y bordes, erosión de subrasante, subbase, y materiales del hombro; lo cual genera huecos bajo y junto a la losa.

La erosión se cuantifica en términos de porcentaje del daño total por erosión, se recomienda optimizar el diseño obteniendo un valor cercano al 100%, ya que si se tienen valores menores a dicho porcentaje, se estaría determinando una estructura sobre diseñada.

Fatiga.

El análisis del criterio de fatiga es utilizado para evaluar los esfuerzos producidos en las losas del pavimento, ante la aplicación de cargas sobre las losas, lo cual puede producir esfuerzos excesivos, que generan agrietamientos. El objetivo es mantener los esfuerzos en el concreto, que constituye la losa, dentro de los límites de seguridad, basándose en el factor de relación de esfuerzos, el cual corresponde al esfuerzo de flexión dividido entre el módulo de ruptura del concreto a los 28 días.

La fatiga se cuantifica en términos de porcentaje de absorción de la fatiga, se recomienda optimizar el diseño obteniendo un valor cercano al 100%, ya que si se tienen valores menores a dicho porcentaje, se estaría determinando una estructura sobre diseñada.

Asimismo, algunos aspectos de diseño, adicionales a la determinación del espesor, tomados en cuenta por el método de diseño de la PCA, para asegurar el funcionamiento y la vida de los pavimentos de concreto, se mencionan a continuación:

- Soporte razonablemente uniforme.

- Prevención de bombeo en subbase relativamente delgada no tratada o tratada con cemento, en proyectos donde el tráfico pesado esperado sea lo suficientemente grande, causando bombeo.
- Uso de un diseño de junta que proporcionará adecuada transferencia de carga; que permita el uso de selladores en las juntas de ser requeridos para la efectividad de las mismas.
- Uso de un diseño de mezcla de concreto y agregados que proveerán concreto de calidad con la resistencia y durabilidad necesaria para una larga vida bajo, las condiciones de exposición actuales.

Para los pavimentos con juntas, la PCA determinó las posiciones críticas de las cargas por eje, las cuales se muestran en la figura:

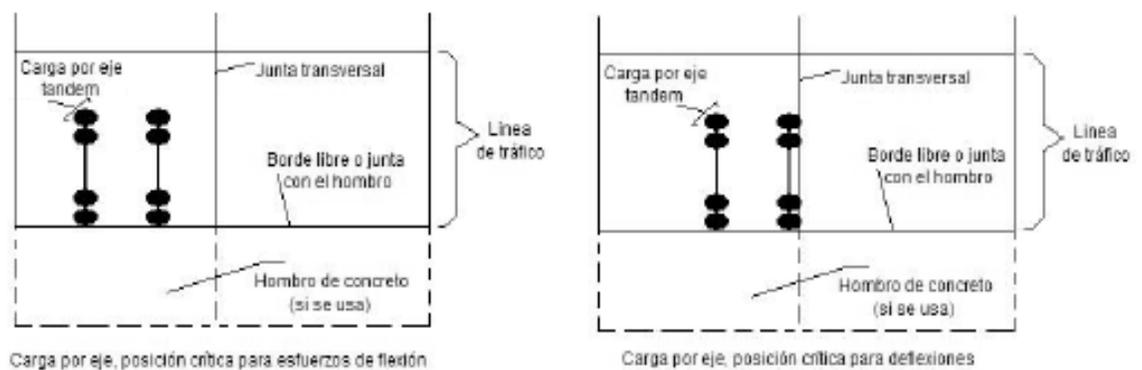


Figura 6 Posiciones críticas de cargas en losas según la PCA

De acuerdo a lo indicado en el manual de diseño de la PCA, las deflexiones críticas en el pavimento ocurren en la esquina de la losa de concreto, donde la

carga del eje está posicionada en la junta, con las llantas en o muy cerca de la esquina. Cabe indicar que al proporcionar apoyo lateral al pavimento (hombro), se reducen considerablemente las deflexiones en la esquina. La ubicación de las cargas de las llantas del tráfico pesado en la parte externa del borde del pavimento crea condiciones más severas que cualquier otra posición de carga; al mover hacia dentro la posición de las llantas, unas pocas pulgadas desde el borde, los efectos decrecen substancialmente.

Para el análisis por esfuerzo de fatiga, la PCA toma la condición más severa: 6% de tráfico pesado; para el análisis por erosión, el cual involucra deflexión en la esquina de la losa, la PCA asume el caso más severo, otra vez 6% de tráfico pesado en el borde. Donde no hay apoyo lateral, las cargas en las esquinas son las críticas (6% del tráfico pesado); y donde hay apoyo lateral, el mayor número de cargas hacia el interior desde la esquina del pavimento son las críticas (94% del tráfico pesado). Lo anterior resulta de estudios realizados por Taragin en 1958, los cuales mostraron que muy poco del tráfico pesado circula justo en el borde del pavimento, para carriles de 12 pies con hombros sin pavimentar, la mayoría del tráfico pesado circula con sus llantas exteriores ubicadas aproximadamente a dos pies del borde.

Factores de diseño del método de la PCA.

El diseño de espesores se realiza basándose principalmente en cinco factores:

1. Resistencia a la flexión del concreto, (Módulo de ruptura, MR).
2. Soporte de la subrasante, o de la combinación de subbase y 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).

Los siguientes aspectos están basados principalmente en el manual de diseño de la PCA,

“Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements”, entre otros.

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).

La consideración de la 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.

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 (in²) cargada (un plato de 30 in de diámetro) dividida entre la deflexión producida ante dicha carga (in).

Cuando se utiliza una subbase se tiene un incremento en el valor k, el cual debe ser usado en el diseño del espesor

3. Periodo de diseño

En la publicación de la PCA, el término periodo de diseño es usado en lugar del término vida del pavimento. El término periodo de diseño es algunas veces considerado como sinónimo del término periodo de análisis de tráfico. 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 tráfico 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. Estos se derivan de estimados de las siguientes cargas de tráfico: ADT

(tráfico promedio diario en ambas direcciones, todos los vehículos, “Average Daily Traffic”); ADTT (tráfico pesado promedio diario en ambas direcciones, “Average Daily Truck Traffic”) y de cargas por ejes de tráfico pesado. 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, los cuales se muestran en la ecuación siguiente:

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

El método de diseño de la PCA recomienda considerar únicamente el tráfico pesado, es decir que se desprece todo el tráfico ligero como automóviles, paneles y pick-ups.

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.

En casos especiales, podría justificarse el uso de un factor de seguridad de carga tan alto como 1.3, para mantener un nivel de serviciabilidad mayor que el normal a través del periodo de diseño.

Formulario de diseño del método PCA

En el manual de diseño: “Thickness Designfor Concrete Highway and Street Pavements” se presenta un formulario para el cálculo del espesor del pavimento, con la finalidad de ayudar al usuario en su procedimiento de diseño.

También existen software como el PCAPAV, desarrollado por la PCA en 1990; BS-PCA, desarrollado por los ingenieros colombianos Efraín Solano y Carlos Benavides en el 2003; y el PCAWin, desarrollado en la Universidad de Illinois en el 2000, los tres basados en el método de la PCA publicado en 1984. El formulario para el cálculo de espesores, contenido en el manual de diseño, es el siguiente:

Cálculo del espesor del pavimento						
Proyecto: _____						
Espesor de prueba: _____ in			Dovelas en las juntas: si _____ no _____			
Subbase-Subrasante, k: _____ pci			Hombro de concreto: si _____ no _____			
Módulo de ruptura, MR: _____ psi			Periodo de diseño: _____ años			
Factor de seguridad de carga, LCF _____						
Carga por eje, kips	Multiplicada por LSF	Repeticiones esperadas	Análisis de fatiga		Análisis de erosión	
			repeticiones permisibles	Porcentaje de fatiga	Repeticiones permisibles	Porcentaje de daño
1	2	3	4	5	6	7
			8. Esfuerzo equivalente _____		10. Factor de erosión _____	
			9. Factor de relación de esfuerzo _____			
Ejes Sencillos						
			11. Esfuerzo equivalente _____		13. Factor de erosión _____	
			12. Factor de relación de esfuerzo _____			
Ejes Tandem						
			14. Esfuerzo equivalente _____		16. Factor de erosión _____	
			15. Factor de relación de esfuerzo _____			
Ejes Tridem						
			Total		Total	

Figura 7 Ejemplo de formulario de diseño del método de la PCA

Formulario para el cálculo del espesor del pavimento, adaptado de Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements, PCA [1984: p.47].

Cabe señalar que el espesor de losa se considerará no adecuado si cualquiera de los totales del factor de fatiga y de erosión son mayores al 100%; por lo que habrá que utilizar un espesor mayor para hacer otra iteración; si la absorción total de fatiga y el daño total de erosión fueran mucho menores que 100%, será necesario utilizar un espesor menor para hacer una nueva iteración; seguir iterando hasta obtener un espesor de losa de concreto óptimo con ambos totales del factor de fatiga y del factor de erosión cercanos al 100%.

METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS ACPA STREETPAVE

Recientemente la American Concrete Pavement Association (ACPA) ha desarrollado una nueva herramienta para el diseño estructural de pavimentos de concreto hidráulico en arterias de bajo volumen de camiones. Esta metodología de verificación es una versión actualizada y revisada del Método de la Portland Cement Association (PCA) la cuál ha sido orientada esencialmente al dimensionamiento de pavimentos rígidos en vías urbanas y rurales de bajo tránsito pesado.

Esta herramienta ha sido lanzada mediante un nuevo software de diseño que, además de determinar el espesor de pavimentos de concreto hidráulico necesario, incorpora recomendaciones para el dimensionamiento de las juntas del pavimento, permite efectuar análisis de sensibilidad de distintas variables y cuenta con la posibilidad de calcular una estructura flexible equivalente; para luego efectuar un análisis del ciclo de vida de ambas alternativas.

Además de su actualización, el objetivo del nuevo desarrollo fue realizar una revisión de la metodología orientándola básicamente al dimensionamiento de vías de bajo tránsito pesado. Asimismo, debido a que se consideró que para reducidos volúmenes de tránsito pesado, el método de la PCA suele brindar resultados conservadores en comparación con otros métodos de verificación, una

de las premisas establecidas fue la de detectar aquellos parámetros que pudieran conducir a posibles sobredimensionamientos.

Nuevo Modelo de Fatiga ACPA StreetPave

El método de la Portland Cement Association, basa su análisis en la verificación de los dos principales modos de falla de los pavimentos rígidos. El criterio de Fatiga es el que permite mantener los esfuerzos del pavimento, producidos por la acción repetitiva de cargas, dentro de los límites de seguridad y con ello prevenir el agrietamiento por fatiga. En tanto que el criterio de Erosión, se ocupa de limitar los efectos de la deflexión del pavimento en bordes, juntas y esquinas de las losas, controlando así la erosión de los materiales de las capas inferiores. Para bajos volúmenes de tránsito pesado, el criterio de fatiga suele ser el determinante en el diseño, en tanto que por el contrario, para elevado tránsito pesado, el criterio de erosión es el que gobierna el espesor mínimo requerido.

El modelo de fatiga de la PCA, se encuentra basado en información originada en ensayos de fatiga en vigas, desarrollados durante la década del 50 y 60. La curva de verificación derivada y adoptada por el modelo, corresponde a la curva envolvente del límite inferior de las repeticiones admisibles para cada relación de tensiones, incorporando mediante esta práctica un nivel alto de confiabilidad en la verificación de este parámetro.

A raíz de esto es que la ACPA encomendó un trabajo de investigación para expandir, mejorar y ampliar el modelo de Fatiga de la PCA, incluyendo la confiabilidad como parámetro para la predicción de la fisuración en pavimentos de hormigón. De esta manera, a diferencia del método de la PCA, en el cual existía una única curva de fatiga, en la nueva metodología, la misma se encuentra determinada por el diseñador, al momento de seleccionar el valor de Confiabilidad acorde con el tipo de vía que dimensionará. En la siguiente figura se representa el modelo de Fatiga ACPA StreetPave, junto con la representación de una serie de curvas correspondientes a distintos valores de confiabilidad.

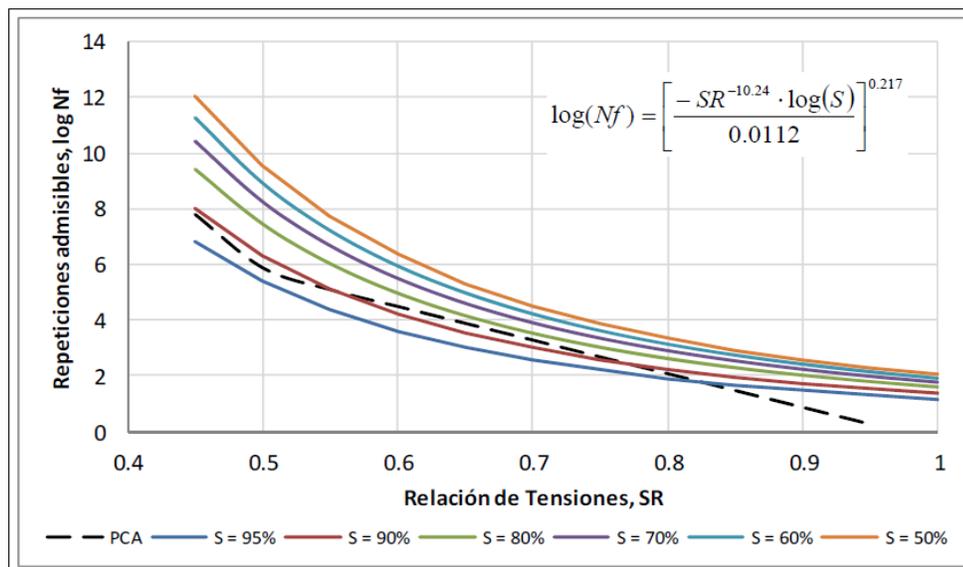


Figura 8 Curvas de fatiga ACPA StreetPave para diferentes niveles de confiabilidad

También se encuentra representada la curva de la PCA, en la cual puede observarse que, en el rango de relación de tensiones usualmente empleado en

las verificaciones (0,5 a 0,8), la misma resulta muy similar a la curva correspondiente a la del 90% de confiabilidad del Modelo ACPA StreetPave.

VARIABLES DE ENTRADA

Las variables de entrada que emplea la metodología para la verificación estructural del pavimento, son en su esencia las mismas que se describieron en el método anterior, así:

- Subrasante
- .Subbase
- Calidad del concreto hidraulico y sus propiedades mecánicas
- Período de diseño
- Tránsito. Configuración de cargas por eje
- Proporción de vehículos pesados en el Carril de diseño
- Transferencia de cargas en juntas transversales y bordes
- Confiabilidad. Porcentaje de Losas FISURADAS

Procedimiento de verificación

Una vez analizadas todas las variables, se procede a incorporarlas a la metodología para la determinación del espesor de calzada más adecuado. Este método de diseño, al igual que el procedimiento de la PCA, determina para cada espesor de calzada propuesto, y en función de las condiciones de proyecto previamente descritas, las repeticiones admisibles para cada carga de ejes simples, dobles y triples, tanto para el criterio de fatiga como de erosión. La relación entre las repeticiones esperadas de cada eje y las admitidas, constituye el consumo de fatiga o daño por erosión específico para cada uno de las cargas previstas.

El espesor tentativo no será adecuado si la sumatoria de los consumos de fatiga o erosión individuales para las cargas previstas supera el 100 %. En este caso, se deberá adoptar un espesor mayor y repetir todo el procedimiento de diseño, hasta que los mismos no superen el 100 %. Si estos valores están muy por debajo del 100 % se procederá en forma inversa, disminuyendo el espesor tentativo hasta acercarse lo más posible al límite máximo del 100 %, tanto para Fatiga como para Erosión. El espesor de pavimento se adoptará al centímetro superior más cercano.

2.2.2.4 MÉTODO AASHTO MEPDG

El procedimiento de diseño basado en principios empírico-mecanicistas, permite evaluar los efectos de la variación de los materiales en el desempeño de los

pavimentos, entregando una relación racional entre las especificaciones de materiales y los procesos constructivos, y el diseño estructural del pavimento. Esta nueva guía incluye, además, métodos que consideran directamente el envejecimiento de los materiales, mes a mes, a lo largo del período de diseño.

En la siguiente figura, se observa que la línea continua representa el desempeño observado en los pavimentos actuales. Una de las principales razones para las fallas prematuras en los pavimentos es la imposibilidad de incorporar adecuadamente en los procedimientos de diseño las variaciones en la calidad de los materiales y en los procesos constructivos. Tales variaciones no fueron consideradas como variables experimentales primarias en la prueba de rodado AASHO.

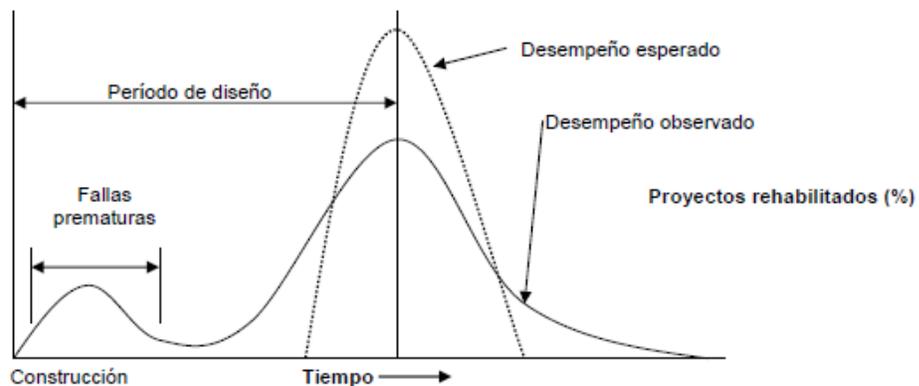


Figura 9 Desempeño de los pavimentos

Además, un procedimiento basado en un enfoque empírico-mecanicista permite, a diferencia de los procedimientos empíricos, incluir futuros avances y conocimientos que puedan ser implementados y desarrollados.

La nueva guía AASHTO presenta procedimientos para el análisis y el diseño de pavimentos flexibles y rígidos, nuevos y rehabilitados, donde los modelos estructurales de pavimentos rígidos son analizados por un programa de elementos finitos bidireccionales (ISLAB2000)

Los programas de cómputo entregan tensiones, deformaciones y desplazamientos en puntos críticos de la estructura modelada y en la subrasante

- El método aplica modelos empíricos de deterioro que permiten evaluar el tipo y la extensión de los daños durante cualquier instante de la vida del pavimento.
- Si alguno de los tipos de daño considerados por los métodos excede el límite fijado como admisible, se debe elaborar un nuevo modelo estructural y repetir los análisis

De manera general, el proceso de diseño se puede bosquejar de la siguiente manera:

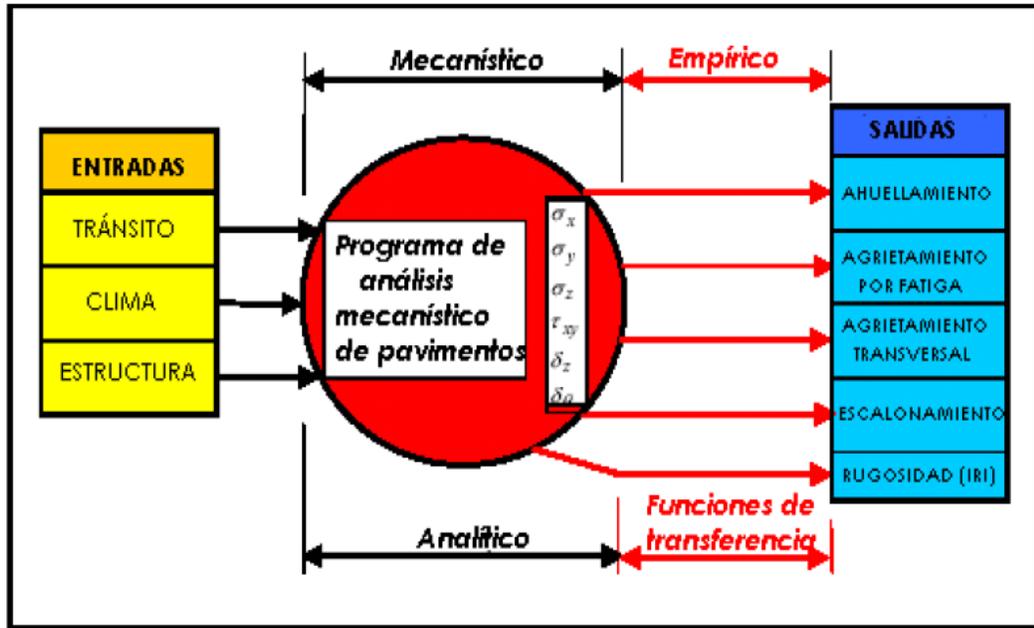


Figura 10 Bosquejo de proceso de diseño MEPDG

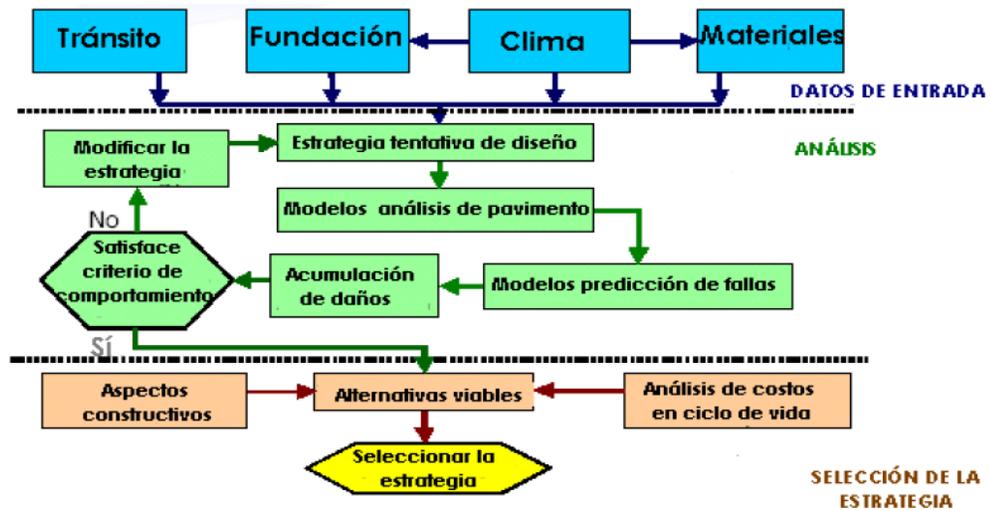


Figura 11 Esquema Conceptual del proceso de diseño

Esta guía, ofrece al usuario una interfaz para el diseño; el aspecto de ésta es la siguiente:

SOFTWARE MEPDG (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide)

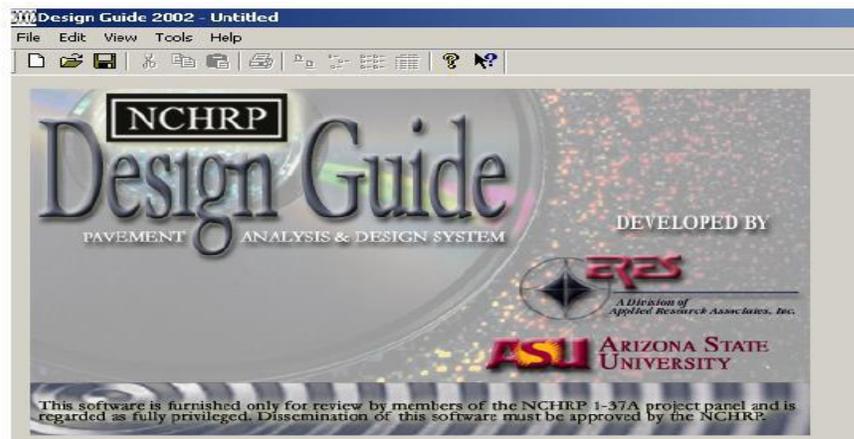


Figura 12 Software MEPDG

MÓDULOS DE LA GUÍA EMPÍRICO –MECANÍSTICA 2002

- ✓ Módulos de datos
- Módulo de información general
- Módulo de tránsito
- Módulo de clima
- Módulo de materiales
- ✓ Módulo de análisis empírico-mecanístico
- ✓ Módulo de salidas

MÓDULOS DEL MÉTODO EMPÍRICO -MECANÍSTICO

El estado de cualquier módulo(o sub-módulo) en un instante determinado se indica en la pantalla de entrada mediante colores: verde-amarillo-rojo, así:



Figura 13 Pantalla de entrada del método MEPDG

MÓDULO DE INFORMACIÓN GENERAL

La pantalla permite incluir la condición anticipada del pavimento al ponerlo en servicio (IRI inicial), así como los valores límites de comportamiento admisibles

CRITERIOS DE COMPORTAMIENTO PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS

Pavimento Rígido
IRI terminal (pulgadas/millas)
Agrietamiento transversal (% de losas agrietadas)
Escalonamiento promedio en las juntas (pulgadas)
Puzonamiento en pavimentos con refuerzo continuo (por milla)

Tabla 1 Parámetros de deterioro evaluados en MEPDG

	Limit	Reliability
<input checked="" type="checkbox"/> Terminal IRI (in/mi)	252	97.5
<input checked="" type="checkbox"/> Transverse Cracking (% slabs cracked)	15	95
<input checked="" type="checkbox"/> Mean Joint Faulting (in)	1	91
<input type="checkbox"/> CRCP Punchouts (per mi)		

Figura 14 Definición de parámetros para pavimentos rígidos en MEPDG

MODULO DE TRÁNSITO

Para este módulo, se deben considerar lo siguiente:

- Distribución de cargas por eje
- Configuración
- Presión de inflado. Pasa de 85 psi (AASHO Road Test) a 115- 120 psi.
- Velocidad operativa de los vehículos. Muy importante en lo concerniente a respuesta de los materiales.
- Distribución horaria y estacional del transito

- AADTT: corresponde al promedio del número de pasadas diarias de vehículos pesados (clase 4 a 13)

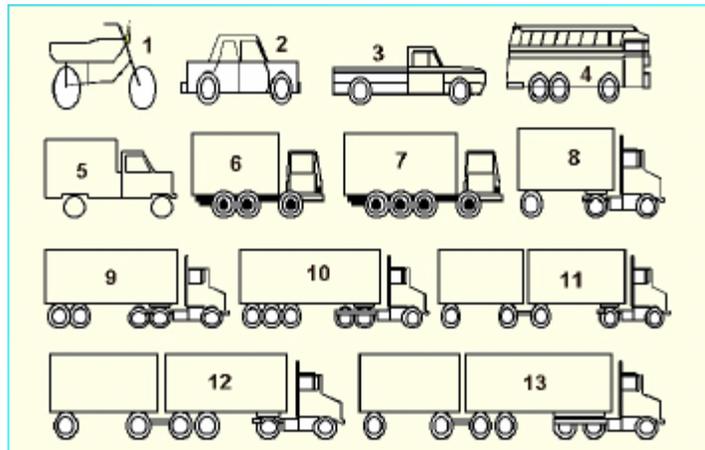


Figura 15 Configuraciones Vehiculares a evaluar

- Crecimiento del tránsito:
 - Sin crecimiento
 - Crecimiento lineal
 - Crecimiento compuesto
- Factor de distribución por camión: distribución normalizada de tipos de camiones durante el año. (Niveles 1 y 2). Determinado mediante datos de censos de tránsito y WIM o dividiendo el número de camiones de una determinada clase por el número total de camiones, medidos en un día típico del año.

De tal forma, que los datos puedan ingresarse a través del siguiente cuadro de dialogo:

Traffic

Design Life (years): 1

Opening Date: October, 1986

Initial two-way AADTT: 1000

Number of lanes in design direction: 2

Percent of trucks in design direction (%): 50.0

Percent of trucks in design lane (%): 95.0

Operational speed (mph): 60

Traffic Volume Adjustment: Edit

Axle load distribution factor: Edit

General Traffic Inputs: Edit

Traffic Growth: Compound, 4%

Import/Export

OK Cancel

Figura 16 Definición de tráfico en MEPDG

Traffic Volume Adjustment Factors

Monthly Adjustment
 Vehicle Class Distribution
 Hourly Distribution
 Traffic Growth Factors

AADTT distribution by vehicle class

Class 4	1.6	
Class 5	24.6	
Class 6	7.6	
Class 7	0.5	
Class 8	5.0	
Class 9	31.3	
Class 10	9.8	
Class 11	0.8	
Class 12	3.3	
Class 13	15.3	
Total	100.0	

Note: AADTT distribution must total 100%.

Load Default Distribution

Level 1: Site Specific Distribution
 Level 2: Regional Distribution
 Level 3: Default Distribution

Load Default Distribution

OK Cancel

15

Figura 17 Ajuste de los Factores de Trafico

Otros factores de ajuste del tránsito:

- **Factor de distribución mensual de camiones:** relación que ajusta el promedio diario anual de camiones en cada mes del año.
- **Factor de distribución horaria:** porcentaje de tránsito medio diario anual de camiones en cada hora del día.
- **Factores de distribución por dirección y por pista:** iguales conceptos que en AASHTO '93.
- **Factor de distribución de carga por eje:** dependen del tipo de camión y grupo de cargas. Se define como el número de ejes en cada intervalo de carga por tipo de eje (simple, tándem, tridem) para cada clase de camión.

Otros datos requeridos:

- Número de ejes por tipo de eje y por clase de camión: Número promedio de ejes de cada tipo por cada clase de camión.
- Configuración de ejes, interesa conocer:
 - ✓ Ancho promedio de ejes, ancho de borde a borde y a bordes de ruedas.
 - ✓ Separación entre eje delantero y trasero
 - ✓ Espaciamiento medio entre ejes: separación longitudinal
 - ✓ Espaciamiento entre llantas duales

- ✓ Presión de inflado: presión del aire caliente dentro del neumático. 10% mayor que la presión en frío. Valor adoptado por defecto = 120 psi

MODULO DE CLIMA

Se deberán considerar los siguientes aspectos:

- Los perfiles de temperatura y humedad a lo largo del período de diseño del pavimento son estimados a través del “Modelo integrado y mejorado de clima”(EICM)
- El software EICM forma parte integral de la guía de diseño, realiza internamente todos los cálculos requeridos por ésta y alimenta las salidas procesadas a las 3 componentes principales de la estructura de la guía:
 - Materiales
 - Respuestas estructurales
 - Predicción de comportamiento

DATOS REQUERIDOS POR EL MÓDULO DE CLIMA PARA MODELAR LAS CONDICIONES TÉRMICAS Y DE HUMEDAD

- Información general: Es la información que ya se introdujo en la pantalla inicial del Módulo de Información General

- Información relacionada con el clima:
 - ✓ Temperatura del aire
 - ✓ Precipitación
 - ✓ Velocidad del viento
 - ✓ Radiación solar
 - ✓ Humedad relativa

La configuración de esta información es la misma para los tres niveles jerárquicos de entrada de datos. El método dispone de una base de datos de estaciones meteorológicas de EEUU donde se encuentra esta información

- Información sobre el nivel freático

Se debe incluir el mejor estimativo entre la profundidad promedio anual y la promedio estacional

- Información sobre propiedades superficiales y de drenaje

Esta información es pertinente a las capas de rodadura asfálticas y de hormigón. Depende de la composición, color y textura superficial de la capa.

Las superficies claras y más reflectivas tienden a presentar menores absorciones. Se establecen 4 valores, aplicables a todos los niveles jerárquicos de entrada de datos

No hay	
Menor	10% del agua lluvia se infiltra. Se aplica cuando la calzada y el hombro de un pavimento flexible esta integradas o cuando un pavimento rígido tiene hombro de concreto ancladas y la junta bien sellada
Moderada	50% del agua lluvia se infiltra Situaciones normales diferentes de las anteriores.
Extensa	100% del agua lluvia se infiltra. Generalmente inaplicable a pavimentos nuevos.

Tabla 2 Propiedades de Drenaje en rodadura de pavimentos

Longitud de la trayectoria de flujo: Distancia máxima que recorre una gota de agua desde que toca la superficie del pavimento hasta el punto donde sale de la misma. Queda definida por una línea que depende de las pendientes superficiales del pavimento.

Pendiente transversal del pavimento (%): Se requiere para determinar el tiempo que tarda en drenar una capa de base o Subbase que se encuentre saturada

- Información sobre la estructura del pavimento y sus materiales

En este instante, el diseñador comienza la elaboración del diseño del pavimento, fijando los tipos de materiales y los espesores de las diferentes capas para un primer tanteo. En relación con las características de los materiales de las diferentes capas, ellas se definen en el módulo siguiente

MÓDULO DE MATERIALES

Las propiedades requeridas para caracterizar los diferentes materiales clasifican en tres grupos:

- Propiedades requeridas para computar la respuesta del modelo de pavimento
- Propiedades requeridas para caracterizar el modo de falla considerado específicas para cada tipo de pavimento y modo de falla)
- Propiedades requeridas para determinar los perfiles de humedad y temperatura en la sección transversal del pavimento

Para pavimentos de concreto, el método las clasifica en cuatro grupos:

- Diferencia efectiva de temperatura:

Es la diferencia de temperatura entre la superficie y el fondo de las losas. Esta diferencia incide en los esfuerzos de flexión por alabeo que afectan a los pavimentos de concreto simple. El programa trae por defecto 10°F, que es el valor determinado en la calibración nacional efectuada en U.S.A.

- Diseño de juntas:

El programa requiere la siguiente información: Separación entre juntas transversales, tipo de sellante (ninguno, líquido, silicona, preformado), opciones de separación de juntas al azar, diámetro y separación de las varillas de transferencia de carga (pasadores)

- Soporte lateral:

El programa brinda las siguientes opciones:

- ✓ Berma de concreto anclada
- ✓ Eficiencia en la transferencia de carga a largo plazo: (relación entre la deflexión en el lado no cargado de la junta y la deflexión en el lado cargado de ella)
- ✓ Uso de losas ensanchadas
- Propiedades de la base

El programar requiere la siguiente información:

- ✓ Tipo de base
- ✓ Condición de la interfaz losa-base(ligada o no)
- ✓ Posibilidad de pérdida de liga con la edad, en el caso de interfaz ligada
- ✓ Índice de erosionabilidad de la base)

INFORMACIÓN DE LA CAPA 1 (losas de concreto)

- Propiedades generales
- ✓ Material (concreto simple–concreto reforzado)
- ✓ Espesor de la capa(el adoptado para el tanteo)

- ✓ Peso unitario
- ✓ Relación de Poisson
- Propiedades térmicas
 - ✓ Coeficiente de expansión térmica
 - ✓ Conductividad térmica
 - ✓ Capacidad calórica
- Propiedades de diseño de la mezcla
 - ✓ Tipo de cemento
 - ✓ Contenido de material cementante
 - ✓ Relación agua/cemento:
 - ✓ Tipo de agregado
 - ✓ Temperatura de esfuerzo cero: temperatura a la cual el concreto se libera de los esfuerzos a que está sometido durante la construcción.

MODULO DE ANALISIS EMPIRICO MECANICISTA

Esta etapa está comprendida por un cómputo analítico, donde en las pantallas iniciales se ha requerido información sobre los meses de construcción y de apertura al tránsito. Ello permite al software coordinar los datos ambientales a las

condiciones estacionales de temperatura y humedad esperadas. De esta manera, el programa calcula los perfiles de temperatura y humedad a través de la profundidad del pavimento y aplica el tránsito anticipado en cada período al modelo estructural afectado por el efecto del clima, de manera de ir evaluando el deterioro del pavimento en un proceso de progresión en el tiempo

MODULO DE SALIDAS

Las salidas se dan en formatos de Excel e incluyen:

- Un resumen de los datos de entrada ,incluyendo variables secundarias e índices basados en los “inputs”
- Una tabla resumen que muestra la evolución de los diferentes índices de deterioro
- Una tabla resumen que compara los valores finales de los deterioros con los criterios de comportamiento
- Una tabla resumen de la evolución de los parámetros que varían con el tiempo o con la temperatura

Para cada tipo de deterioro:

- ✓ Una tabla resumen de su evolución en el tiempo
- ✓ Una gráfica de su evolución en el tiempo.

CAPITULO III: ALTERNATIVA DE DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO DE CONCRETO HIDRÁULICO

3.1 VARIABLES DE DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO DE CONCRETO HIDRÁULICO MEDIANTE METODOLOGÍA MECANICISTA – EMPÍRICA

Como se propuso en los objetivos de esta investigación, este trabajo está orientado al desarrollo de un método de diseño mecánico- empírico ajustado para su aplicabilidad en El Salvador.

Este capítulo se ocupa de la identificación, propuesta y detalle de variables de diseño requeridas por la metodología en mención, a partir de los diferentes datos con los que se dispone en El Salvador.

Como parte del proceso de diseño, ésta etapa resulta trascendental, ya que las Variables de diseño son la base de toda la evaluación de estructural y de desempeño para un pavimento, Por tanto, se procura una alta confiabilidad y objetividad en la obtención, tabulación, tratamiento y procesamiento de los datos característicos de nuestro país para poder así proponer un diseño final satisfactorio a requerimientos mínimos.

APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

Esta metodología requiere de un procedimiento iterativo. Así, se debe elegir un diseño de prueba y luego analizarlo en detalle para determinar si el mismo cumple con las expectativas de comportamiento previstas. Si el diseño de prueba no

satisface las expectativas, se redimensiona o bien cambia el tipo y/o propiedades de los materiales a usar para el pavimento.

El diseño que finalmente satisfaga las expectativas buscadas, se considera que es factible desde el punto de vista estructural y funcional y puede luego ser considerado para otras evaluaciones tales como el análisis del costo del ciclo de vida.

A continuación se presenta el diagrama de funcionamiento de la alternativa propuesta para El Salvador:

FLUJOGRAMA DE PROCEDIMIENTO DE DISEÑO PARA LA ALTERNATIVA

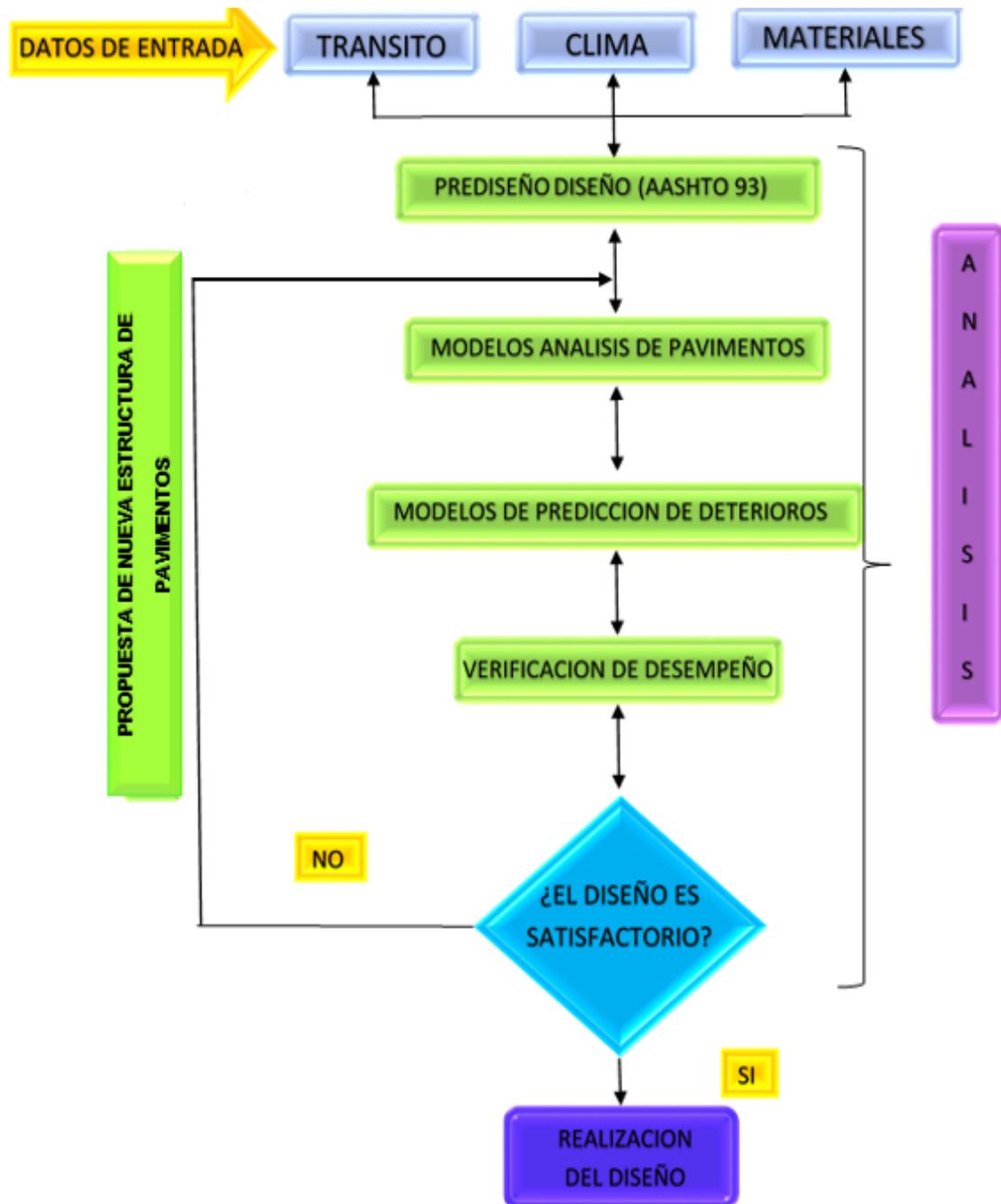


Figura 18 Diagrama del procedimiento de diseño para alternativa Mecánica-Empírica

Como se puede apreciar en el diagrama anterior se muestra el procedimiento efectuado para el desarrollo de la alternativa mecanicista – empírica para El Salvador.

Primer paso: se tiene la entrada de datos, para su procesamiento, estos datos son:

- Trafico

- Condiciones Climáticas

- Propiedades de los materiales.

Segundo paso: realizar un pre- diseño por el método AASHTO 93.

Tercer paso: analizar estructuralmente el pavimento previamente diseñado, dicho análisis estructural sería realizado por medio del software EverFe, esto lo conseguiremos sometiendo el pavimento a las siguientes cargas:

- Cargas de eje de rueda.

- Cargas por efectos térmicos.

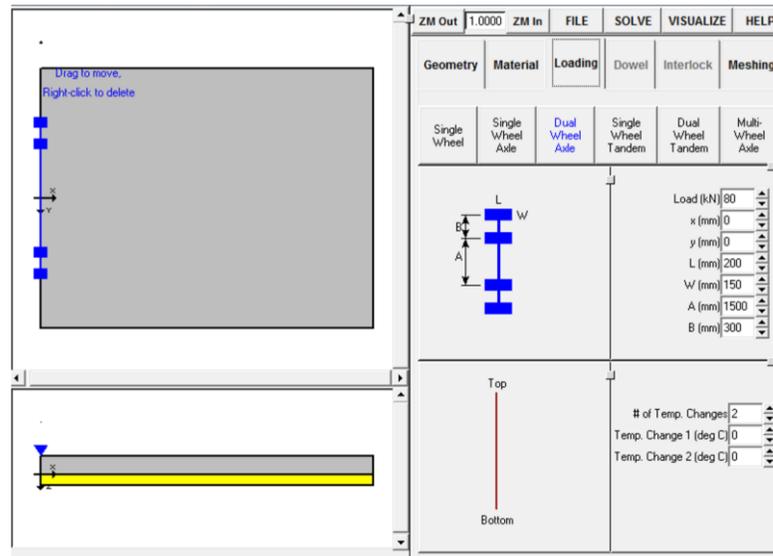


Figura 19 Ventana de ingreso de cargas para realizar el análisis estructural

Cuarto paso: realizar los modelos de deterioro, verificando condiciones de IRI, escalonamiento y agrietamiento tanto longitudinal como transversal.

Quinto paso: comparar los resultados obtenidos en los modelos de deterioros con los parámetros límites y verificar así que el desempeño del pavimento es aceptable o no; en el caso de que este cumpla con las condiciones se acepta el diseño, en caso que no lo sea entonces, se procede a cambiar el valor de espesores en la estructura del pavimento y se repite el paso 3 y 4 para su verificación hasta que el diseño es aceptado.

Este capítulo se enfoca en el primer proceso del diagrama de flujo, es decir definir las variables a utilizar para realizar el diseño.

3.1.1 TRÁNSITO

3.1.1.1 Espectros de Carga

Para el diseño estructural de pavimentos, el método MEPDG solicita la caracterización de las cargas impuestas al tráfico a través de los denominados espectros de carga, es por ello que en la alternativa propuesta para El Salvador, es importante tomar en cuenta estos valores ya que con ellos se caracterizarían las cargas a las cuales se someterá el pavimento.

Esto consiste en la determinación de la magnitud de las cargas transmitidas al pavimento, la frecuencia con que son transmitidas durante el horizonte de proyecto establecido, para una vía determinada.

Estos parten del pesaje en básculas efectuado en diferentes estaciones para un determinado período de tiempo. Los pesos de cada eje determinado con pesaje, es tabulado según eje de carga a que corresponda (simple, sencillo dual, tándem y trídem) de acuerdo a los pesos máximos establecidos para esos cuatro tipos de ejes. Estos ejes son contabilizados, y representados como una fracción del total para cada tipo de eje de carga

A continuación se presentan los espectros de carga generados con los pesos de ejes de vehículos determinados con pesaje en las básculas de las estaciones de Acajutla, Zacatecoluca y una estación móvil durante los años 2012 y 2013.

Estas tablas son generadas contabilizando o muestreando los ejes que cumplen con los pesos establecidos para cada uno de los tipo de eje de carga (simple, sencillo dual, tándem y trídem). Así, el espectro se genera al dividir el número de ejes contabilizados en rangos de pesos en relación al total de ejes.

ESPECTROS NORMALIZADOS PARA LOS AÑOS 2012 Y 2013.

EJE SIMPLE

Lim. Inf	Lim. Sup	Lim. Inf	Lim. Sup	Media (lb)	Media (ton)	Muestra	Espectro normalizado
>=0	<1000	0	1000	500	0.5	0	0
>=1000	<2000	1000	2000	1500	1.5	256	0.003731289
>=2000	<3000	2000	3000	2500	2.5	1150	0.016761649
>=3000	<4000	3000	4000	3500	3.5	5928	0.086402659
>=4000	<5000	4000	5000	4500	4.5	43954	0.640644813
>=5000	<6000	5000	6000	5500	5.5	14553	0.212115029
>=6000	<7000	6000	7000	6500	6.5	2015	0.029369325
>=7000	<8000	7000	8000	7500	7.5	493	0.007185646
>=8000	<9000	8000	9000	8500	8.5	180	0.002623563
>=9000	<10000	9000	10000	9500	9.5	51	0.000743343
>=10000	<11000	10000	11000	10500	10.5	11	0.000160329
>=11000	<12000	11000	12000	11500	11.5	6	8.74521E-05
>=12000	<13000	12000	13000	12500	12.5	2	2.91507E-05
>=13000	<14000	13000	14000	13500	13.5	2	2.91507E-05

>=14000	<15000	14000	15000	14500	14.5	2	2.91507E-05
>=15000	<16000	15000	16000	15500	15.5	3	4.3726E-05
>=16000	<17000	16000	17000	16500	16.5	2	2.91507E-05
>=17000	<18000	17000	18000	17500	17.5	1	1.45753E-05
					sumas	68609	1.00

Tabla 3 Espectros de Carga, Eje Simple

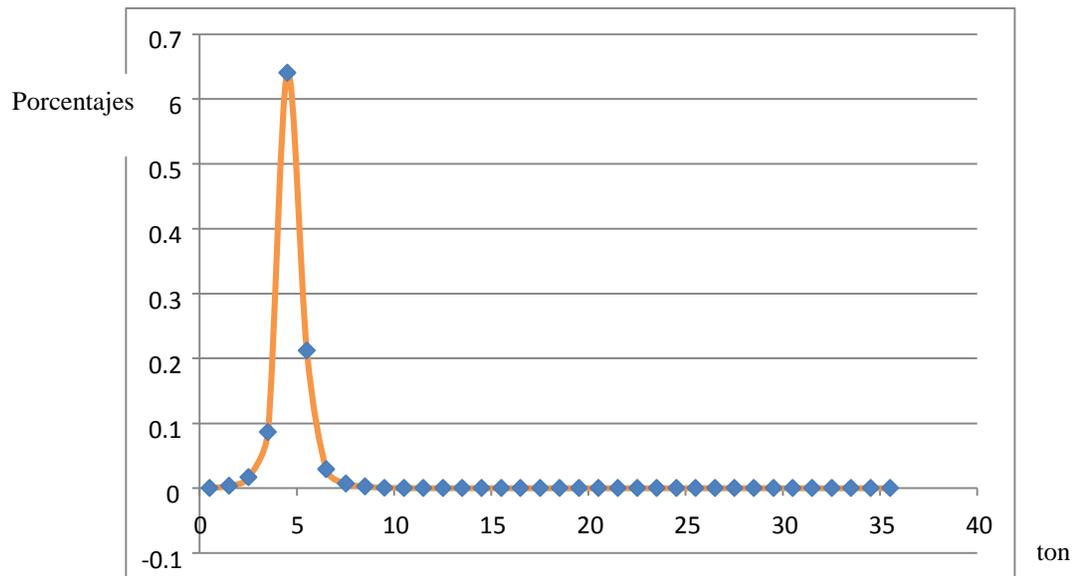


Figura 20 Espectros de Carga para Eje Sencillo

EJE SENCILLO DUAL

Lim. Inf	Lim. Sup	Lim. Inf	Lim. Sup	Media	Media (ton)	Muestra	Espectro normalizado
>0	<=1000	0	1000	500	0.5	0	0
>1000	<=2000	1000	2000	1500	1.5	11	0.000925692
>2000	<=3000	2000	3000	2500	2.5	155	0.013043844
>3000	<=4000	3000	4000	3500	3.5	519	0.043675839
>4000	<=5000	4000	5000	4500	4.5	999	0.084069679
>5000	<=6000	5000	6000	5500	5.5	1128	0.094925524
>6000	<=7000	6000	7000	6500	6.5	1024	0.086173525
>7000	<=8000	7000	8000	7500	7.5	1112	0.093579063
>8000	<=9000	8000	9000	8500	8.5	1681	0.141462594
>9000	<=10000	9000	10000	9500	9.5	2240	0.188504586
>10000	<=11000	10000	11000	10500	10.5	1397	0.117562905
>11000	<=12000	11000	12000	11500	11.5	492	0.041403686
>12000	<=13000	12000	13000	12500	12.5	296	0.024909535
>13000	<=14000	13000	14000	13500	13.5	185	0.015568459
>14000	<=15000	14000	15000	14500	14.5	191	0.016073382
>15000	<=16000	15000	16000	15500	15.5	167	0.01405369
>16000	<=17000	16000	17000	16500	16.5	124	0.010435075
>17000	<=18000	17000	18000	17500	17.5	90	0.007573845
>18000	<=19000	18000	19000	18500	18.5	50	0.004207692
>19000	<=20000	19000	20000	19500	19.5	19	0.001598923
>20000	<=21000	20000	21000	20500	20.5	2	0.000168308

>21000	<=22000	21000	22000	21500	21.5	1	8.41538E-05
>22000	<=23000	22000	23000	22500	22.5	0	0
					sumas	11883	1.00

Tabla 4 Espectro de carga, Eje Dual

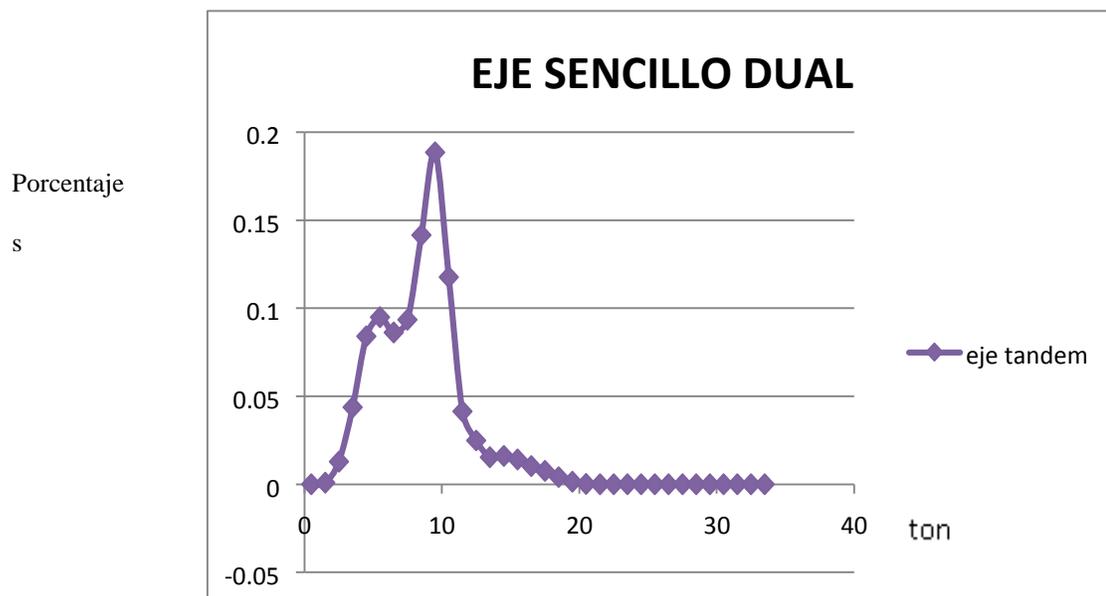


Figura 21 Espectro de Carga para eje sencillo dual

EJE TANDEM

Lim. Inf	Lim. Sup	Lim. Inf	Lim. Sup	Media	Media (ton)	Muestra	Espectro normalizado
>0	<=1000	0	1000	500	0.5	0	0
>1000	<=2000	1000	2000	1500	1.5	0	0
>2000	<=3000	2000	3000	2500	2.5	0	0
>3000	<=4000	3000	4000	3500	3.5	148	0.00174635
>4000	<=5000	4000	5000	4500	4.5	529	0.00624204
>5000	<=6000	5000	6000	5500	5.5	1478	0.01743994
>6000	<=7000	6000	7000	6500	6.5	2004	0.02364658
>7000	<=8000	7000	8000	7500	7.5	2910	0.03433709
>8000	<=9000	8000	9000	8500	8.5	3168	0.03738141
>9000	<=10000	9000	10000	9500	9.5	3423	0.04039033
>10000	<=11000	10000	11000	10500	10.5	3712	0.04380044
>11000	<=12000	11000	12000	11500	11.5	4456	0.05257941
>12000	<=13000	12000	13000	12500	12.5	5045	0.05952943
>13000	<=14000	13000	14000	13500	13.5	7341	0.08662151
>14000	<=15000	14000	15000	14500	14.5	13114	0.15474111
>15000	<=16000	15000	16000	15500	15.5	18605	0.2195332
>16000	<=17000	16000	17000	16500	16.5	11838	0.13968471
>17000	<=18000	17000	18000	17500	17.5	3921	0.04626658
>18000	<=19000	18000	19000	18500	18.5	1293	0.015257
>19000	<=20000	19000	20000	19500	19.5	757	0.00893236
>20000	<=21000	20000	21000	20500	20.5	389	0.00459008
>21000	<=22000	21000	22000	21500	21.5	217	0.00256053
>22000	<=23000	22000	23000	22500	22.5	156	0.00184075

>23000	<=24000	23000	24000	23500	23.5	91	0.00107377
>24000	<=25000	24000	25000	24500	24.5	69	0.00081418
>25000	<=26000	25000	26000	25500	25.5	38	0.00044839
>26000	<=27000	26000	27000	26500	26.5	22	0.00025959
>27000	<=28000	27000	28000	27500	27.5	12	0.0001416
>28000	<=29000	28000	29000	28500	28.5	7	8.2598E-05
>29000	<=30000	29000	30000	29500	29.5	1	1.18E-05
>30000	<=31000	30000	31000	30500	30.5	1	1.18E-05
>31000	<=32000	31000	32000	31500	31.5	1	1.18E-05
>32000	<=33000	32000	33000	32500	32.5	2	2.3599E-05
					sumas	84748	1.00

Tabla 5 Espectros de carga, eje tándem

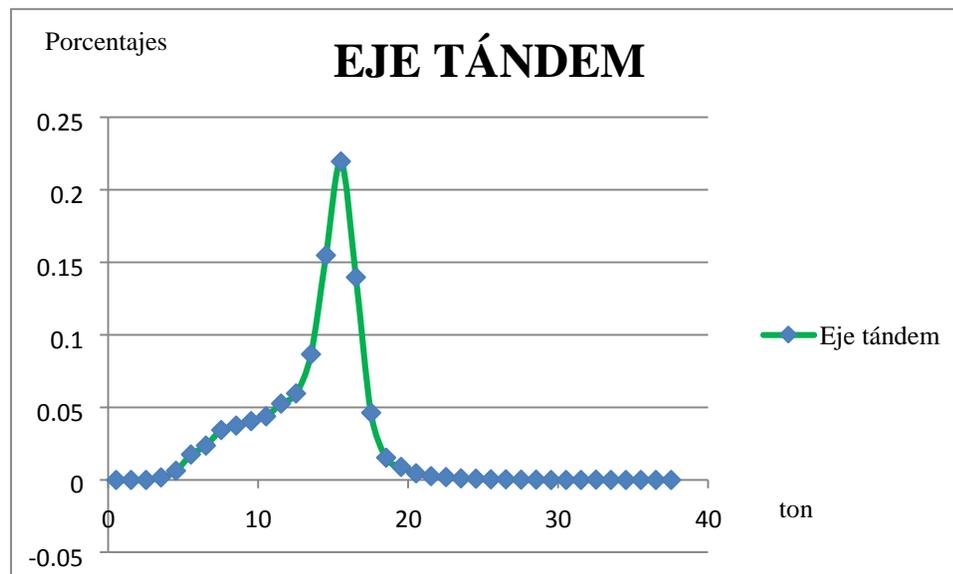


Figura 22 Espectros de carga para eje tándem

EJE TRIDEM

Lim. Inf	Lim. Sup	Lim. Inf	Lim. Sup	Media	Media (ton)	Muestra	Espectro normalizado
>0	<=1000	0	1000	500	0.5	0	0
>1000	<=2000	1000	2000	1500	1.5	0	0
>2000	<=3000	2000	3000	2500	2.5	0	0
>3000	<=4000	3000	4000	3500	3.5	0	0
>4000	<=5000	4000	5000	4500	4.5	15	0.00075449
>5000	<=6000	5000	6000	5500	5.5	34	0.00171018
>6000	<=7000	6000	7000	6500	6.5	58	0.00291736
>7000	<=8000	7000	8000	7500	7.5	203	0.01021075
>8000	<=9000	8000	9000	8500	8.5	172	0.00865148
>9000	<=10000	9000	10000	9500	9.5	81	0.00407424
>10000	<=11000	10000	11000	10500	10.5	138	0.0069413
>11000	<=12000	11000	12000	11500	11.5	132	0.00663951
>12000	<=13000	12000	13000	12500	12.5	131	0.00658921
>13000	<=14000	13000	14000	13500	13.5	194	0.00975806
>14000	<=15000	14000	15000	14500	14.5	300	0.01508978
>15000	<=16000	15000	16000	15500	15.5	639	0.03214124
>16000	<=17000	16000	17000	16500	16.5	1337	0.06725014
>17000	<=18000	17000	18000	17500	17.5	2830	0.14234696
>18000	<=19000	18000	19000	18500	18.5	4199	0.21120668
>19000	<=20000	19000	20000	19500	19.5	5210	0.26205925
>20000	<=21000	20000	21000	20500	20.5	2638	0.1326895
>21000	<=22000	21000	22000	21500	21.5	846	0.04255319

>22000	<=23000	22000	23000	22500	22.5	283	0.0142347
>23000	<=24000	23000	24000	23500	23.5	119	0.00598561
>24000	<=25000	24000	25000	24500	24.5	89	0.00447664
>25000	<=26000	25000	26000	25500	25.5	61	0.00306826
>26000	<=27000	26000	27000	26500	26.5	49	0.00246466
>27000	<=28000	27000	28000	27500	27.5	41	0.00206227
>28000	<=29000	28000	29000	28500	28.5	21	0.00105628
>29000	<=30000	29000	30000	29500	29.5	24	0.00120718
>30000	<=31000	30000	31000	30500	30.5	13	0.00065389
>31000	<=32000	31000	32000	31500	31.5	5	0.0002515
>32000	<=33000	32000	33000	32500	32.5	5	0.0002515
>33000	<=34000	33000	34000	33500	33.5	4	0.0002012
>34000	<=35000	34000	35000	34500	34.5	4	0.0002012
>35000	<=36000	35000	36000	35500	35.5	2	0.0001006
>36000	<=37000	36000	37000	36500	36.5	2	0.0001006
>37000	<=38000	37000	38000	37500	37.5	1	5.0299E-05
					sumas	19880	1.00

Tabla 6 Espectros de carga, eje tridem

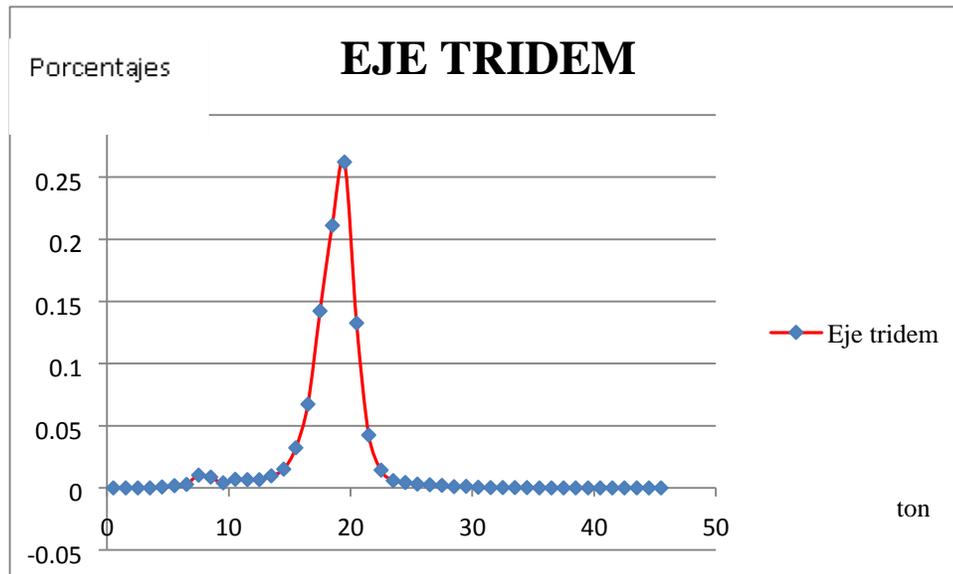


Figura 23 Espectro de carga para eje tridem

Además, se han tomado como base estudios realizados para la zona norte del país, (esto como ejemplo de los datos que son necesarios en el estudio de pavimentos) en específico, los datos utilizados el Diseño Final de Pavimento de la Vialidad Principal VP 07 (Nuevo Trazado SAM21 km 8.2 - Km. 24.2 (Tahuilapa – Matazano), tramo B, comprendido entre las estaciones 13+700 (Fin de VP07A) y 19+760, que forma parte del Estudio de Diseño Final para el Mejoramiento de la Red Vial de la Zona Norte de El Salvador.

3.1.1.2 Período de diseño.

En la sección 2.1.1., pag. II-7 de la Guía AASHTO 93, se recomiendan los valores para períodos de diseño para diferentes tipos de vías. Para este proyecto se ha considerado un periodo de diseño de 20 años. Se considera como año de apertura al tráfico del pavimento el año 2015

3.1.1.3 Tasa de crecimiento.

IA partir del Estudio de Trafico del Proyecto se obtuvieron los factores de proyección para obtener el modelo de asignación de tráfico para el periodo de diseño. Las tasas de crecimiento por tipo de vehículo en los 20 años de análisis son presentados en la tabla siguiente:

Tipo de vehículos /Periodo	1 – 5 años	5 – 10 años	10 – 15 años	15 – 20 años
Pesados	5.1%	4.5%	4.0%	3.1%
Livianos	5.9%	5.2%	4.7%	3.6%

Fuente: estudio de tráfico del proyecto.

Tabla 7 Tasa de Crecimiento

El Método MEPDG considera solamente el TPDA de vehículos pesados, al cual denomina AADTT (Average Annual Daily Truck Traffic). La Federal Highway Administración (FHWA) considera 13 diferentes clases de vehículos, de los cuales desde la Clase 4 en adelante corresponden a vehículos pesados. Por tanto, la tasa de crecimiento a considerar es de 3%.

3.1.1.4 TPDA

Para el diseño de estructuras de pavimento es necesario conocer el número de vehículos que pasan por un punto dado. Para el efecto se realizan estudios de volúmenes de tránsito, los cuales pueden variar desde los más amplios en un sistema de caminos, hasta el recuento en lugares específicos tales como:

- puentes,
- túneles
- intersecciones de carreteras.

. La tabla siguiente corresponde a la demanda vehicular de un proyecto en El Salvador, para ejemplificar los valores del tpda.

AÑO	TPDA	Tasa Livianos	Tasa Pesados	Auto	Pickup	Microbus	Bus	C2	C3	C4	T2 - S1	T2 - S2	T2 - S3	T3 - S1	T3 - S2	T3 - S3
2007	9			1	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2008	29			1	9	2	1	11	1	0	0	0	0	0	3	1
2009	30			1	10	2	1	11	1	0	0	0	0	0	3	1
2010	32			1	10	2	1	12	1	0	0	0	0	0	3	1
2011	1219			325	350	33	40	203	20	0	0	8	0	0	187	55
2012	1287	0.059	0.051	344	370	35	43	213	21	0	0	9	0	0	196	57
2013	1350	0.052	0.045	362	389	36	44	222	21	0	0	9	0	0	205	60
2014	1416	0.052	0.045	381	410	38	46	233	22	0	0	9	0	0	214	63
2015	1485	0.052	0.045	401	431	39	49	243	23	0	0	10	0	0	224	66
2016	1558	0.052	0.045	422	453	41	51	254	24	0	0	10	0	0	234	68
2017	1634	0.052	0.045	444	477	43	53	265	26	0	0	11	0	0	244	72
2018	1706	0.047	0.04	464	499	45	55	276	27	0	0	11	0	0	254	74
2019	1781	0.047	0.04	486	523	47	57	287	28	0	0	11	0	0	264	77
2020	1859	0.047	0.04	509	548	48	60	298	29	0	0	12	0	0	275	80
2021	1941	0.047	0.04	533	573	50	62	310	30	0	0	12	0	0	286	84
2022	2026	0.047	0.04	558	600	52	64	323	31	0	0	13	0	0	297	87
2023	2095	0.036	0.031	578	622	54	66	333	32	0	0	13	0	0	307	90
2024	2166	0.036	0.031	599	644	56	69	343	33	0	0	14	0	0	316	93
2025	2239	0.036	0.031	621	667	57	71	354	34	0	0	14	0	0	326	95
2026	2315	0.036	0.031	643	691	59	73	365	35	0	0	15	0	0	336	98
2027	2393	0.036	0.031	666	716	61	75	376	36	0	0	15	0	0	346	101
2028	2475	0.036	0.031	690	742	63	77	388	37	0	0	15	0	0	357	105
2029	2558	0.036	0.031	715	769	65	80	400	39	0	0	16	0	0	368	108
2030	2645	0.036	0.031	741	796	67	82	412	40	0	0	16	0	0	380	111

Fuente: Estudio de Tráfico del Proyecto.

Tabla 8 Ejemplo de valores de TPDA

De ahí, dado que se considera año de apertura 2015, el TPDA a utilizar es el que corresponda al conteo de vehículos pesados.

FHWA			
TIPO	VEHICULO	VALORES	PORCENTAJE
1	AUTO	401	32.84
2	PICK-UP	431	35.30
3	MICROBUS	39	3.19
4	BUS	49	4.01
5	C2	243	19.90
6	C3	23	1.88
7	C4	0	0.00
8	T2-S1	0	0.00
9	T2-S2	10	0.82
10	T2-S3	0	0.00
11	T3-S1	0	0.00
12	t3-s2	224	18.35
13	t3-s3	66	5.41
	TPDA	1486	$\Sigma=100.0$

Tabla 9 Conteo de Vehículos

Entonces el TPDA a usar es el conteo de vehículos desde clase 4 a 13: 615

3.1.1.5 Factores de ajuste mensual.

Los factores de distribución mensual de vehículos se utilizan para determinar la variación mensual en el tráfico de vehículos dentro del año base. Estos valores son simplemente la relación del tráfico mensual de vehículos al TPDA. Naturalmente, el promedio de las relaciones para los 12 meses del año base debe igualar 1.0.

Si no hay información disponible, asumir la distribución uniforme (es decir, 1.0 por todos los meses para todas las clases del vehículo). Por tanto el factor de ajuste mensual es 1.0

3.1.1.6 Distribución de la clase vehicular.

La distribución normalizada de la clase vehicular representa el porcentaje de cada clase de vehículo (clases 4 a 13) dentro del TPDA para el año base. La suma de los porcentajes de TPDA de todas las clases de vehículos debe igualar 100.

En la siguiente tabla pueden observarse los porcentajes correspondientes a los vehículos considerados en el TPDA:

FHWA			
TIPO	VEHICULO	CANTIDAD	PORCENTAJE
1	AUTO	401	32.84
2	PICK-UP	431	35.30
3	MICROBUS	39	3.19
4	BUS	49	4.01
5	C2	243	19.90
6	C3	23	1.88
7	C4	0	0.00
8	T2-S1	0	0.00
9	T2-S2	10	0.82
10	T2-S3	0	0.00
11	T3-S1	0	0.00
12	T3-S2	224	18.35
13	T3-S3	66	5.41
	TPDA	1486	100.0

Fuente: propia

Tabla 10 Determinación de la clasificación vehicular

3.1.1.7 Factores de distribución de carga por eje.

La distribución de carga por eje es idéntica a los valores por defecto (derivados del LTPP) provistos en el software de la Guía MEPDG para cada clase de vehículos, tipo de eje, categoría de carga y meses del año.

3.1.1.8 Factor de distribución por carril.

El factor de distribución por carril, es otro de los parámetros importantes a considerar al realizar las proyecciones de carga, y se define como aquel que recibe el mayor número de ESAL's. Para un camino de dos carriles, cualquiera de los dos puede ser el carril de diseño, ya que forzosamente se canaliza por ese carril.

Para carreteras de dos o más carriles por sentido, la Guía AASHTO 93, recomienda los siguientes valores:

Número de carriles en una sola dirección.	Porcentaje de ESAL en carril de diseño
1	100
2	80 – 100
3	60 – 80
4	50 – 75

Fuente: Guía para Diseño de Estructuras de Pavimento, AASHTO, 1993 Pag. 11-9

Tabla 11 Porcentajes de carriles según AASHTO

Considerando una carretera de un carril por sentido, y en función de la tabla anterior se establece, un factor de distribución por carril de 100.

3.1.1.9 Ancho de carril

El pavimento tiene un diseño de ancho de carril estándar de 12 pies (3.65 m).

3.1.1.10 Número de ejes/camiones.

El número de ejes simples, tándem, tridem y cuádruple para cada clase de vehículo es el mismo por defecto derivado de los datos del LTPP (provistos en la guía MEPDG).

3.1.1.11 Ubicación media de las ruedas

Es la distancia entre el borde externo de la rueda al borde externo del pavimento, en un nivel 3 de entrada de datos se puede asumir que el desvío promedio de las llantas está localizado a 18 pulg desde el borde del pavimento.

3.1.1.12 Desvío Standard de la deriva del tránsito

La desviación estándar para el desvío de la rodadura es de 10 pulg (25.4 cms), este valor es utilizado típicamente para pavimentos de concreto hidráulico.

3.1.1.13 Configuración de eje

La configuración de eje es la siguiente:

- Promedio de ancho de eje (dimensiones externas de borde a borde): 8.5pies (2.59 m).
- Espaciamiento de llanta dual: 12 pulg (30.48 cm).

- La presión de las llantas simples y duales es de 120 psi (827.37 KPa). El carril de diseño es de 12 pies de ancho (3.65 m).

El espaciamiento de eje promedio para tándem, tridem y cuádruple son los siguientes:

Tipo de Eje	Espaciamiento entre ejes (Pulg.)
Tándem	51.6
Tridem	49.2
Cuádruple	49.2

Tabla 12 Espaciamiento entre ejes

3.1.1.14 Velocidad operativa de los vehículos

Considérese velocidad operacional de 55.92 mph (90 km/h), pero en nuestro país los límites de velocidad oscilan entre los 70 y 80 km/h, por lo que se tomaría un valor ente este rango.

3.1.2 CLIMA.

Las condiciones climáticas tienen un efecto muy trascendente en el diseño mecánico-empírico de pavimentos, ya que factores climáticos tales como la temperatura y la humedad afectan directamente el comportamiento de los materiales y el pavimento.

La temperatura y humedad están relacionadas con el alabeo en las losas de concreto hidráulico y tienen un efecto muy significativo para definir su comportamiento a la fatiga. Estos factores juegan también un rol muy importante

en la apertura y cierre de juntas, curado, etc. En la estructura de pavimento, éstas son dos de las variables que pueden significativamente afectar la capa de pavimento y las propiedades de la subrasante, y por lo tanto, su capacidad y funcionalidad.



Figura 24 Alabeo por temperatura

Durante el día en general el alabeo por temperatura y el de humedad se contrarrestan, en cambio durante la noche se combinan generando esfuerzos de deformación en los pavimentos.

El software incorporado a la Guía de Diseño AASHTO MEPDG, analiza el desempeño de la estructura de pavimento a través de una sofisticada herramienta de modelo climático llamado *Mejoramiento del Modelo Climático Integrado* (EICM). Este es un programa dimensional acoplado del flujo del calor y de la humedad, que simula cambios en el comportamiento y características de

los materiales de pavimento y subrasante en conjunción con las condiciones climáticas a través de los años de operación.

El EICM consiste en tres principales componentes:

1. El Modelo Climático Estructural de Materiales (Modelo CMS).
2. El Modelo CRREL del Alza de la Helada y Establecimiento del deshielo.
3. El Modelo de Infiltración y Drenaje (Modelo ID).

Como ya se recalcó con anterioridad, de la guía MEPDG, tal cual, no se puede aplicar así como se encuentra, dado que ésta opera con configuraciones preestablecidas según las condiciones climáticas específicas para regiones geográficas EE.UU., pero lo que sí es rescatable y aplicable es la metodología de diseño (mecánico-empírica), y por esta razón solo tomaremos en cuenta el modelo climático estructural de materiales, a los cuales les afecta directamente la temperatura y el modelo de infiltración y Drenaje.

Los modelos climáticos son muy importante al momento de predecir el desgaste que tendrán los pavimentos, y las posibles fallas que se darán después de estar sometidos a estos.

Es muy importante mencionar que en nuestro país no se da un registro horario diario, ya que en cuestión de clima las variaciones que se dan no son muy críticas, por lo tanto se tendrán datos como los que presentaremos a continuación:

Esta es una tabla resumen de las temperaturas y precipitaciones, en esta caso, estos datos son de los más importantes que debemos conocer para predecir las deformaciones de los pavimentos, y así poder hacer un análisis más apegado a la realidad del país.

San Salvador			
Meses	Máxima (°C)	Mínimas (°C)	Precipitaciones (mm)
Enero	30.5	17.2	0
Febrero	31	18.1	0
Marzo	30.9	17.7	15
Abril	31	19.8	60
Mayo	30.4	20.7	90
Junio	29.9	20.3	220
Julio	29.6	19.6	400
Agosto	29.5	19.8	340
Septiembre	29.7	19.9	260
Octubre	27.2	19.1	450
Noviembre	29.1	17.8	25
Diciembre	29.2	17.1	0
Resumen Anual	29.9	19	1890

Tabla 13 Temperaturas anuales de San Salvador

Estos son ejemplo de datos de temperatura y precipitación para el lugar de interés. En ese caso se deberá ir a la estación más cercana al proyecto y pedir el registro, como los que se muestran a continuación:

Datos de precipitación acumulada mensual.

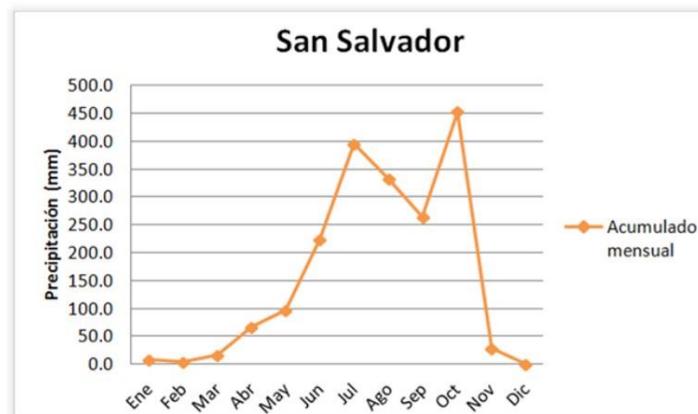


Figura 25 Precipitación acumulada mensual

Si no se tiene un registro diario se tendrá un registro mensual, para temperaturas máximas tenemos:

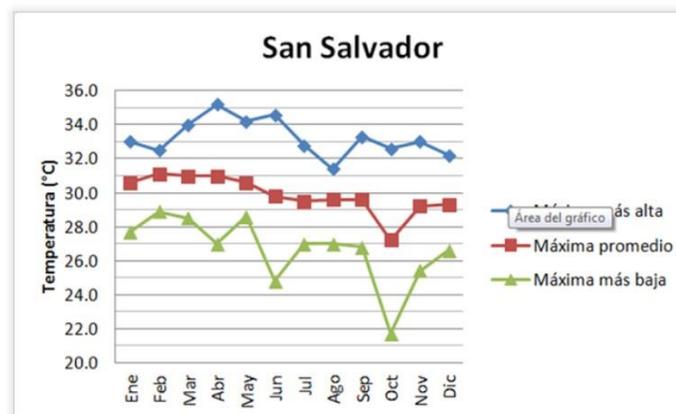


Figura 26 Temperaturas máximas mensuales de San Salvador

Para temperaturas mínimas tenemos:

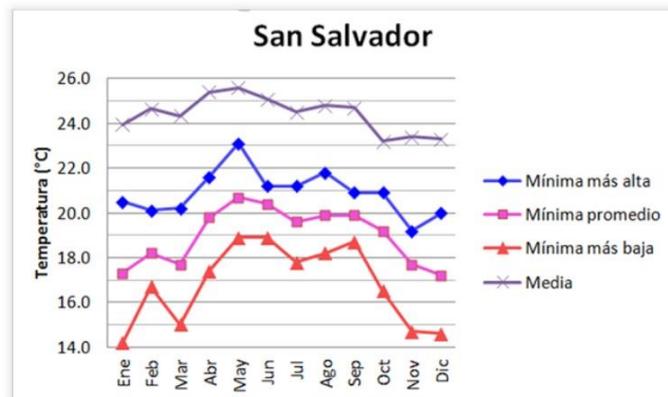


Figura 27 Temperaturas mínimas mensuales de San Salvador

3.1.3 MATERIALES

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.

En el diseño de pavimentos deben definirse todas las capas que lo constituyen y las propiedades de los materiales para cada una de ellas, para el diseño de pavimento de concreto hidráulico permite una amplia variedad de propiedades de los materiales y espesores de capas, a continuación se presentan las variables que el método MEPDG, considera para la realización de un diseño de este tipo de pavimento y que serán incluidas en la alternativa propuesta para El Salvador.

Un paquete estructural rígido está formado habitualmente por una losa de concreto hidráulico, una base tratada con materiales cementantes o con asfalto,

granular no tratada (también llamada no estabilizada o ligada), una subbase tratada o no tratada esto en casos donde se considere conveniente el uso de esta, de lo contrario solo tendría una capa intermedia, una capa de subrasante compactada, otra sin compactar y por último la roca madre. La roca madre sólo tiene importancia en el análisis estructural si se encuentra a menos de 3 m de profundidad, por lo que en la mayoría de los casos se desprecia.



Figura 28 Estructura de pavimentos de concreto hidráulico

En la figura 28 se muestra las capas que puede tener un pavimento de concreto hidráulico.

3.1.3.1 Capa de concreto (Losa de concreto)

La capa de concreto hidráulico no es dividida en subcapas para propósitos de análisis y diseño. A continuación se presentan las propiedades requeridas de análisis y diseño, las cuales se dividen en tres categorías que son:

- Propiedades generales y térmicas.
- Propiedades de mezcla del concreto hidráulico.
- Propiedades de fuerza y rigidez.

Propiedades generales y térmicas.

- Espesor de capa. Para el caso de la alternativa M – E, este espesor de losa será calculado en el pre diseño realizado por medio del método AASHTO 93.
- Coeficiente de Poisson (μ). Es la relación entre la deformación lateral y la deformación axial en una probeta con carga axial. Es la constante que relaciona el módulo de rigidez y el módulo de Young en la siguiente ecuación:

$$E = 2G(r + 1)$$

Donde E es el módulo de Young, G es el módulo de rigidez y r es el coeficiente de Poisson. La fórmula sólo es válida dentro del límite elástico de un material. La norma ASTM E-132 proporciona un método para determinar el coeficiente de Poisson.

- El coeficiente de expansión térmica (α). El coeficiente de expansión térmica para concreto hidráulico es un valor que depende del tipo de agregado y cantidad de cemento que se le ponga a la mezcla de concreto.
- Conductividad térmica. Es la cantidad de calor que fluye normalmente a través de la superficie en unidades de área por unidad de tiempo del gradiente de temperatura normal a la superficie.
- Capacidad de calor. Es el calor requerido para elevar la temperatura de una unidad de masa en un material por una unidad de temperatura.

Propiedades relacionadas a la mezcla de concreto hidráulico.

El proceso de diseño requiere la siguiente entrada relacionada a la mezcla del concreto hidráulico para poder modelar el comportamiento del material incluyendo la contracción, la temperatura del esfuerzo cero del concreto hidráulico y el deterioro de la transferencia de carga.

- Tipo de cemento

El tipo de cemento generalmente utilizado para la fabricación de concreto hidráulico es el que obedece a la norma ASTM C – 1157 que es del tipo HE, que es un tipo de cemento de alta resistencia inicial, a continuación se presentan sus características:

Requerimientos físicos de cementos con adición norma AST C-1157 (HE)

Tipo de cemento	HE
Expansión al autoclave, máx. %	0.80
Tiempo de fraguado, prueba Vicat	
Inicial, min.(minutos)	45
Final, máx.(minutos)	420
Resistencia a la compresión PSI	
Min 1 día	1450
3 días	2465
7 días	-
28 días	-
Calor de hidratación, cal/gr	
Max 7 días	-
28 días	-
Resistencia a los sulfatos exp. %	
Max 6 meses	-
1 año	-

Tabla 14 Requerimientos físicos del cemento

- Relación agua/cemento. Este valor es calculado dependiendo del método utilizado para el diseño de la mezcla, en el caso de PCA depende de la resistencia para la cual se requiera diseñar el pavimento de concreto hidráulico, existen tablas en las cuales se encuentran los valores de dicha relación dependiendo de la resistencia y si al concreto se le incorporara

aire o no, a continuación se muestra la tabla para obtener la relación a/c para una resistencia dada y sin aire incluido:

Relación entre A/C y la resistencia a compresión del concreto	
Resistencia a compresión a 28 días (MPa)	Relación A/C por peso (concreto sin aire incluido)
40	0.42
35	0.47
30	0.54
25	0.61
20	0.69
15	0.79

Tabla 15 Relación Agua Cemento

Relación a/c según método Füller.

Este método considera la siguiente fórmula para el cálculo de la relación a/c.

$$\frac{a}{c} = \frac{1}{z}; \text{ donde } z = k_1 * R_m + 0.5$$

Donde:

K_1 = Factor que depende de la forma del agregado. De 0.0030 a 0.0045 para piedra chancada y de 0.0045 a 0.0070 para piedra redondeada.

R_m = Resistencia promedio requerida.

- Tipo de agregado. Se define el tipo de agregado que se utilizara para la mezcla de concreto hidráulico.
- Temperatura del esfuerzo cero del concreto hidráulico. Definido como la temperatura (después y durante el proceso de colado y curado) el cual la capa de concreto presenta esfuerzos termal cero. Si la temperatura es menor que la temperatura del esfuerzo cero entonces ocurrirá un esfuerzo de tensión en la losa.

Propiedades de resistencia y rigidez.

Como se conoce el concreto hidráulico gana resistencia a medida transcurre el tiempo y los cambios que ocurren en la rigidez del mismo son considerados por la guía de diseño MEPDG.

- Módulo de ruptura: Valor que debe ser calculado por medio de ensayos de vigas en laboratorio.
- Módulo estático de elasticidad. Este valor está relacionado con la resistencia a la compresión del concreto con el que se realizara el pavimento, para calcular dicho valor pueden utilizarse las siguientes formulas:

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

$$E_c = 6750*MR \text{ (psi)}$$

Donde:

W = peso unitario del concreto en lbs/pie³

$F'c$ = resistencia a la compresión del concreto lbs/pie²

MR = Modulo de ruptura del concreto

- Resistencia a la compresión. Valor determinado mediante pruebas de
- Laboratorio.
- Resistencia a la tensión a la fractura

3.1.3.2 Capa de base.

En el diseño de pavimentos existen tres tipos diferentes de bases que se pueden utilizar, estos son:

- Bases estabilizadas con asfalto
- Bases estabilizadas con materiales cementantes
- Bases de material natural (No ligadas)

3.1.3.3 Capas estabilizadas con materiales cementantes

- Modulo elástico promedio de la capa
- Peso específico del material, determinado en el laboratorio.
- Relación de Poisson, dado por el material a utilizar.
- Conductividad térmica, dato dado por el tipo de material
- Capacidad calorífica, dato dado por el tipo de material

3.1.3.4 Base no ligada, sub base, subrasante.

Para este tipo de material es necesario conocer los siguientes datos:

- Espesor de capa (solamente en capas de base o subbase). Si para capas de subrasante de limo estabilizado o compactado necesitan ser considerados separadamente de la subrasante natural pueden ser definidos como una capa estructural.
- Capa de módulo de Resiliencia, para las bases o sub bases granulares no tratadas, así como para la subrasante se realiza un análisis para conocer el módulo de resiliencia, esto se realiza mediante la norma ASTM T-274, la cual lo realiza por medio de un ensaye triaxial.
- Relación de Poisson, de acuerdo con el tipo de material.

Módulo de reacción de la subrasante.

El módulo de reacción de la subrasante, sirve para el diseño de pavimentos rígidos y para la determinación del valor efectivo de MK se debe proceder de la siguiente manera:

✚ Es conveniente asumir combinaciones de los diferentes datos que son necesarios para el cálculo del módulo de reacción de la subrasante, los cuales deberán ser considerados como sigue:

1. Tipo de subbase con resistencias y valores de módulos.
2. Espesor de la base o subbase.
3. Perdida de soporte (LS).
4. Profundidad a la fundación rígida.
5. Espesor estimado de la losa.

A continuación se presenta un ejemplo para cálculo.

1	2	3	4	5	6
mes	Módulo de subrasante Mr (PSI)	Módulo de subbase Esb (PSI)	Valor compuesto k (PCI)	Valor de k en fundación rígida (PCI)	Daño relativo Uf
Enero	20,000	50,000	1,100	1,350	0.35
Febrero	20,000	50,000	1,100	1,350	0.35
Marzo	2,500	15,000	160	230	0.86
Abril	4,000	15,000	230	300	0.78
Mayo	4,000	15,000	230	300	0.78
Junio	7,000	20,000	400	540	0.78
Julio	7,000	20,000	400	540	0.60
Agosto	7,000	20,000	400	540	0.60
Septiembre	7,000	20,000	400	540	0.60
Octubre	7,000	20,000	400	540	0.60
Noviembre	4,000	15,000	230	300	0.78
Diciembre	20,000	50,000	1,100	1,350	0.35
				Total	7.25
Promedio = U / # meses considerados. = 7.25 / 12 = 0.60					
Módulo efectivo de reacción de la subrasante =				k (PCI)	= 540
Corrección por pérdida de soporte =				k (PCI)	= 170
				k (PCI)	= 46.1

Tabla 16 Ejemplo de datos a utilizar en el diseño

Como se muestra en la tabla anterior en la columna 2 se coloca el módulo de resiliencia de la subrasante para cada mes.

En la columna 3 se colocan los valores del módulo de resiliencia de la subbase, los cuales serán asumidos.

Luego por medio del Abaco del módulo compuesto de reacción de la subrasante, para cada uno de los meses, se estima el valor de k, que es el efecto combinado de la subrasante y base o sub base; esto es, suponiendo que la capa rígida se encuentra más de 3 metros de profundidad.

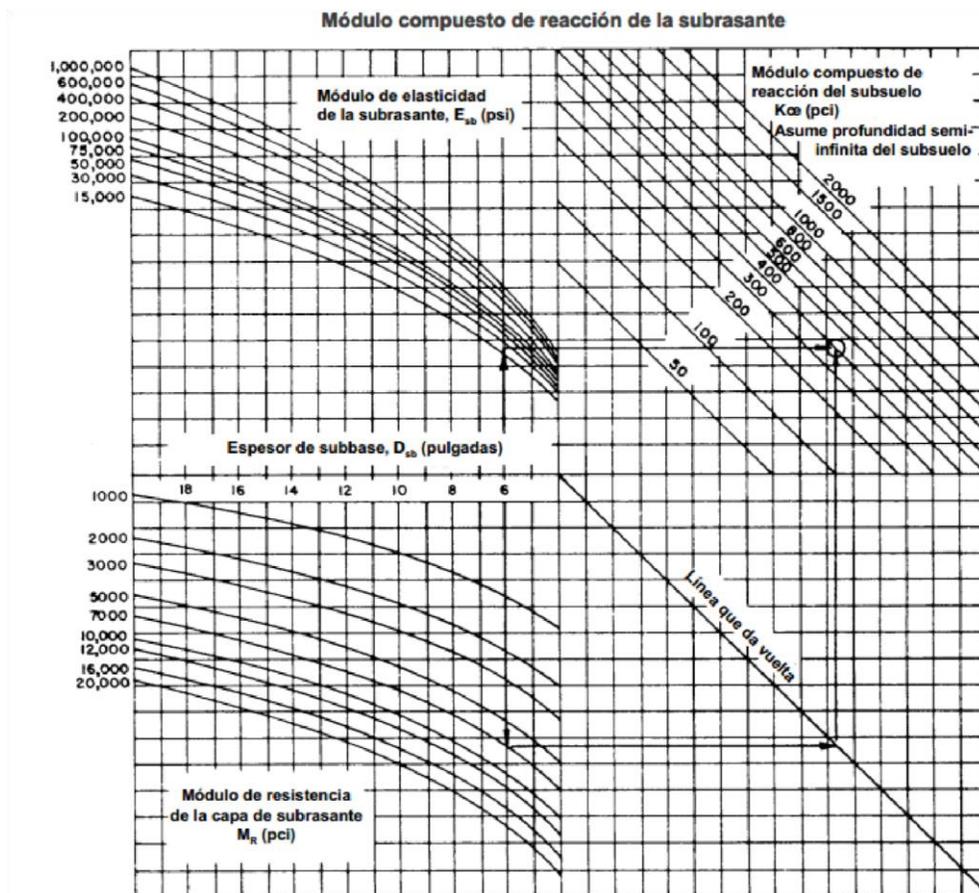


Figura 29 Diseño de Espesores

3.2. MODELOS DE DETERIORO PARA PAVIMENTOS SIMPLES CON JUNTAS (JPCP) EMPLEADOS PARA ANALISIS DE FALLAS EN LA ALTERNATIVA DE DISEÑO MECANICO-EMPIRICA

Modelos de deterioro incorporados por el método

Para el diseño de pavimentos rígidos nuevos, el nuevo método NCHRP 1-37A presenta dos opciones: concreto simple con juntas (con o sin pasadores de

traspaso de carga en juntas transversales), y de concreto continuamente reforzado.

En el presente trabajo, sólo se analizarán los pavimentos de concreto hidráulico simple con juntas, por ser el tipo más comúnmente utilizado en América Latina.

Para dichos pavimentos, los deterioros que se verifican son los siguientes:

- Agrietamiento transversal
- Agrietamiento longitudinal
- Escalonamiento
- IRI

a) Agrietamiento Transversal y longitudinal

Las tensiones y deformaciones originadas en la estructura por las cargas del tránsito aplicadas bajo determinadas condiciones climáticas consumen un cierto porcentaje de fatiga.

Las sucesivas aplicaciones de cargas van acumulando consumo de fatiga, hasta que se generan fisuras en la losa. Estas fisuras por fatiga pueden originarse de diferente manera, dependiendo de la condición predominante de alabeo de losa y la configuración geométrica de las cargas.

Los modelos de agrietamiento verifican dos posiciones críticas alternativas de cargas. La primera posición crítica es en el borde externo, centrada entre dos

juntas transversales, asociada a alabeo convexo en la losa, que produce tracción en el fondo de la losa y genera con el tiempo grietas transversales que progresan de abajo hacia arriba (“bottom-up cracking”). La otra posición crítica corresponde a las cargas sobre las juntas transversales bajo alabeo cóncavo de la losa que producen tracción en la superficie de la losa y generan con el tiempo grietas que progresan de arriba hacia abajo (“top-down cracking”).

Los modelos calculan el consumo de fatiga asociado a la aplicación sucesiva de cargas bajo ambas condiciones críticas, considerando las respectivas condiciones climáticas bajo las cuales se aplicaron las sucesivas cargas. De allí se correlaciona el consumo de fatiga con el porcentaje de losas fisuradas.

b) Escalonamiento

De acuerdo a la Guía de Diseño (NCHRP, 2004), la repetición de cargas sobre las juntas transversales aumentan la posibilidad de aparición de escalonamiento entre ambas caras de dichas juntas, especialmente cuando ocurre alguna de las siguientes condiciones desfavorables:

- Eficiencia de la transferencia de cargas inferior al 80%;
- Base, subbase, hombro o suelo de fundación erosionables;
- Agua libre bajo la losa

En estos casos, el escalonamiento puede ocasionar pérdida de calidad de rodadura, aumentando la irregularidad (IRI), y requiriendo eventualmente rehabilitación temprana de la superficie pavimentada.

El modelo de escalonamiento va acumulando el escalonamiento incremental causado individualmente por las sucesivas cargas de tránsito a lo largo del período de diseño. Al igual que en los modelos de agrietamiento, se considera una cierta variación del posicionamiento de las cargas respecto al borde externo, a través de datos basados en análisis estadísticos.

c) IRI

La evolución del IRI a lo largo del período de diseño es función del IRI inicial con el cual quedó el pavimento recién construido (IRI_0), y del desarrollo de otros deterioros a través del tiempo, tales como grietas transversales, escalonamiento, deterioro de juntas, agrietamiento en esquinas de losas y parches para el caso del hormigón simple con juntas. Los modelos de predicción del IRI incorporados en el nuevo método incluyen ambos factores (IRI_0 y deterioros), y también la incidencia de la subrasante y factores climáticos (NCHRP, 2004).

Dado lo anterior para la alternativa mecanicista-empírica para El Salvador, se ha programado realizar este paso por medio del programa HiperPave, el cual es una herramienta que nos ayudara a realizar el análisis de desempeño a lo largo del tiempo de vida útil del pavimento para las condiciones antes mencionadas, luego

el programa genera los resultados de una manera gráfica, en la cual se coloca el valor límite de cada uno de los deterioros a revisar y ahí mismo se comprueba si se da cumplimiento a la condición o no.

CAPITULO IV: ANÁLISIS COMPARATIVO

4.1 GENERALIDADES

En este capítulo se llevarán a cabo los diseños de pavimentos de concreto hidráulico, tanto el diseño por medio de la metodología AASHTO 93, como la alternativa de diseño mecanicista - empírico, luego se realiza la comparación de los resultados de cada método.

Para realizar el diseño de estructuras de pavimento, es necesario conocer la importancia que tendrá, donde será construida y con qué lugares va a conectar, para saber que clasificación tendrá, cuál será la geología del lugar y el crecimiento de tráfico que tendrá a futuro, es por esta razón que se ha seleccionado el área Metropolitana de San Salvador para hacer el diseño, ya que se tiene mayor información recolectada de tráfico, de condición del tiempo como precipitaciones, temperaturas, humedades, entre otros aspectos de diseño. En nuestro país El área Metropolitana es de mucha importancia, porque ahí se desarrolla la mayoría de las actividades socioeconómicas del país, diversas actividades industriales, de servicio, comercio, cultura, política, etc. Se centran en el AMSS, y por ende debe contar con una excelente red vial. Esto se puede apreciar mejor en el siguiente mapa donde la mayoría de las actividades se realizan alrededor de la capital.

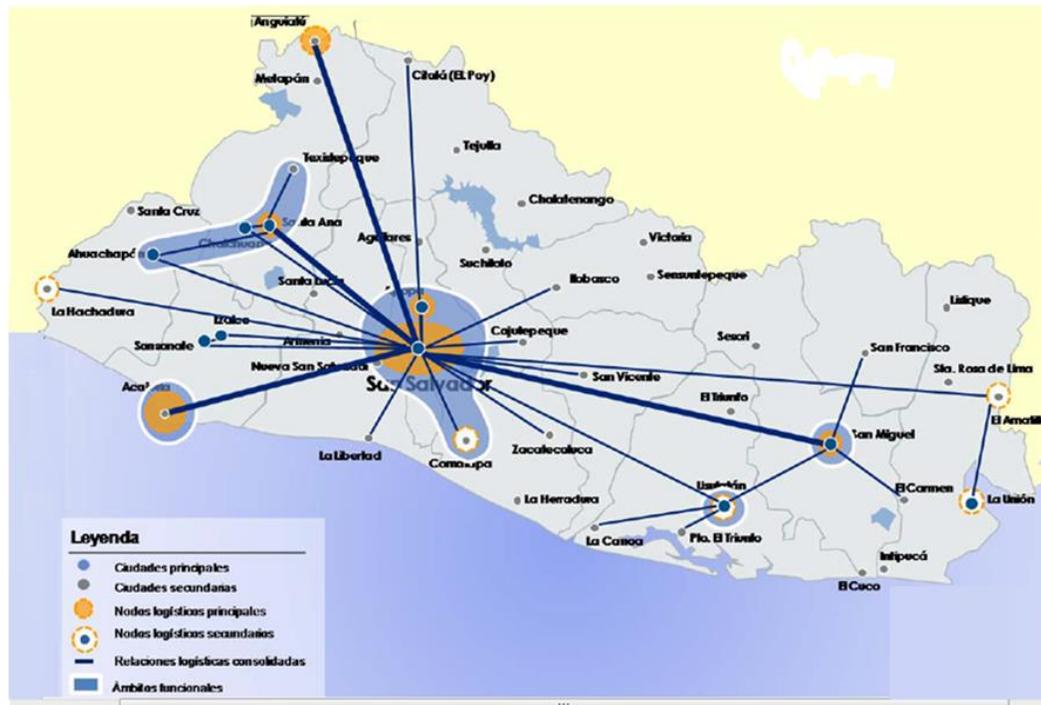


Figura 30 Importancia estratégica del área metropolitana de San Salvador como centro económico y logístico

4.2 DISEÑO POR MEDIO DEL METODO AASHTO 93

El método de diseño AASHTO 93 es uno de los mejores métodos para diseñar pavimentos y se ha utilizado el software de diseño WinPass, se han realizado 3 Diseños diferentes para ver el comportamiento del pavimento según el tipo de material de base, los espesores y su resistencia a flexión.

4.2.1 Diseño 1

Datos de entrada generales para WinPass	
Espesor estimado de la base (pulgadas)	8
Serviciabilidad final (m/km)	2.5
Periodo de diseño	20 años
Tasa de crecimiento	3%
Factor de distribución por dirección.	50 %
Factor de distribución por carril.	90 %
Número total de ESAL's	27,608,125
Confiabilidad	90%
• Módulo de ruptura (losa de concreto)	42 kg/cm2 (600 psi)
Módulo de elasticidad del concreto	4, 050,000 psi.
• Coefficiente de transferencia de carga	2.7
• Tipo de base	Granular
Módulo de reacción (K) de subrasante (PSI/in)	457.2 pci
Serviciabilidad inicial, Pi	4.5
Serviciabilidad final, Pi	2.5
Calidad de drenaje	Buena
coeficiente de drenaje	1.05

Tabla 17 Datos de entrada generales para diseño 1

Estos datos son los que se han utilizado, para realizar la propuesta de diseño por el método AASHTO 93, el cual explicamos más a detalle a continuación.

El programa WinPass ofrece un método sencillo de diseño, y en esta ocasión nos vamos a auxiliar de él. Lo primero que se hace es definir los datos generales de nuestro proyecto como se muestra a continuación

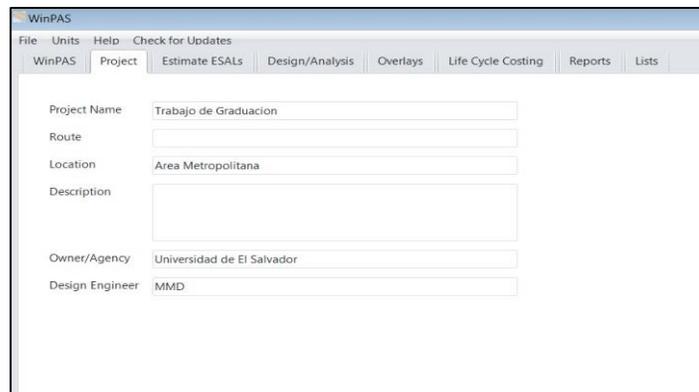


Figura 31 Descripción del proyecto

Luego se introduce datos para el cálculo de esal's proponiendo un espesor de 8 pulgadas, y los demás datos de diseño que se muestran en el programa.

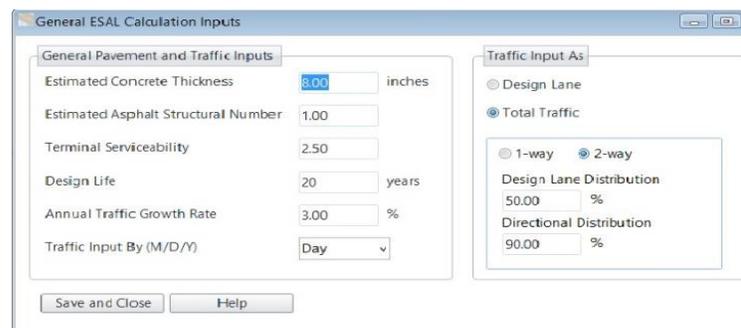


Figura 32 Datos general para el cálculo de Esal's

El programa calcula los espesores de la estructura del pavimento en base a la carga que va a soportar y para eso hace un cálculo de Esal's introduciendo la cantidad de vehículos por el tipo de eje como lo vemos a continuación.

The screenshot shows a software window titled "Total ESALs by Vehicle Type". At the top, there are design parameters:

- Estimated Rigid Thickness: 8.00
- Design Life: 20 years
- Estimated Asphalt SN: 1.00
- Annual Growth Rate: 3.00 %
- Terminal Serviceability: 2.50
- Traffic Input By (M/D/Y): Day

Below these are "Save and Close" and "Help" buttons. The main section is "Vehicle Load and Volume Data", which contains a table with columns for Vehicle, Axle Load (kips), Axle Type, and Number. The table is split into two columns for input.

Vehicle	Axle Load (kips)	Axle Type	Number	Vehicle	Axle Load (kips)	Axle Type	Number
P	2.2	Single		SU3	11	Single	
	5.5	Single			0	Single	
	0	Single	12,245		44	Single	2
SU	11	Single		WB-50	11	Single	
	22	Single			35.2	Tanderr	
	0	Single	1,806		44	Tridem	387
BUS, SU2	11	Single		WB-60	0	Single	
	36.3	Tanderr			0	Single	
	0	Single	81		0	Single	
					0	Single	
					0	Single	0

At the bottom of the window, the totals are displayed:

- Total Rigid ESALs: 27,608,125
- Total Flexible ESALs: 25,733,503

Figura 33 Cálculo de Esal's

El resultado total de los Esal's de diseño nos da de 27, 608,125 y esto se utilizara para el cálculo adecuado de espesores de la estructura de pavimento.

Teniendo todos los datos de entrada se selecciona la opción de análisis de diseño para pavimentos de concreto y se despliega la pantalla que vemos a continuación.

The screenshot shows a software window titled "Concrete Pavement Design". It contains two main sections: "Concrete Pavement Design/Analysis Inputs" and "Concrete Pavement Design/Analysis".

Concrete Pavement Design/Analysis Inputs:

Concrete Thickness	10.28	inches
Total Rigid ESALs	27,608,125	
Reliability	90.00	%
Overall Standard Deviation	0.35	
Flexural Strength	600	psi
Modulus of Elasticity	4,050,000.0	psi
Load Transfer Coefficient	2.70	
Modulus of Subgrade Reaction	457.2	psi/in.
Drainage Coefficient	1.05	
Initial Serviceability	4.50	
Terminal Serviceability	2.50	

Concrete Pavement Design/Analysis:

Warning! Input Value Changed, Press Solve For to Recalculate

Buttons: Save and Close, Help, Solve For

Figura 34 Diseño del pavimento de concreto hidráulico

Al ingresar todos los datos de diseño obtenemos un espesor de losa de 10.28 pulgadas, lo que equivale a 26.11 cm, por lo que el diseño se lleva hasta los 30 cm de espesor para la losa.

En este diseño cabe mencionar que se está proponiendo una base granular, y por esta razón escogemos un Módulo resiliente de la subbase de 18,000 psi y el Módulo resiliente de la subrasante es de 9,388.7 psi, a partir de la correlación utilizada en este programa, que se ha desarrollado bajo el proyecto NCHRP 128,

la evaluación de la guía AASHTO encontró una relación no lineal entre el módulo resiliente y el CBR. Aun la guía AASHTO, sugiere una relación de $1.500 \cdot \text{CBR}$. Otros estudios (Indiana, Ohio) han demostrado una correlación tan baja como $800 \cdot \text{CBR}$ y que van desde 750 hasta 3.000 veces el valor de CBR. Este rango está de acuerdo con la correlación que se establece en el proyecto NCHRP 128, evaluándolo con un CBR para la subrasante de 10 que es lo que se muestra a continuación.

Help

Help Screen for Resilient Modulus of the Subgrade

Empirical relationships have been developed between the CBR (California Bearing Ratio) value (using dynamic compaction, the R-value, and the in-site resilient modulus of the soil.

Determine Sugrade Resilient Modulus Using

CBR Value 10 Resilient Modulus: 9388.7 psi

R-Value 0 Resilient Modulus: 0 psi

Resilient Modulus of the Subgrade 9388.7 psi

Figura 35 Valor del módulo resiliente, a partir del CBR

Help

Help Screen for Modulus of Subgrade Reaction

Resilient Modulus of the Subgrade = psi

Material Type	Resilient Modulus (psi) (1 MPa = 145 psi)
Lean Concrete Subbase (LCB, Econocrete)	1,000,000-2,000,000
Cement-Treated Subbase (CTB)	500,000-1,000,000
Hot-Mix or Warm-Mix Asphalt Subbase	350,000-1,000,000
Cement-Stabilized Subgrade	50,000-1,000,000
Asphalt-Treated Subbase (ATB)	40,000-300,000
Lime-Stabilized Subgrade	20,000-70,000
Unstabilized Subbase	15,000-45,000
Fine-Graded or Natural Subgrade	3,000-40,000

Determine Unadjusted Subgrade Resilient Modulus

Calculate Using AASHTO 93 Method Enter Value psi/in

Resilient Modulus of the Subbase = psi (Leave blank if none)

Subbase Thickness (4 to 12 inches) = inches

Unadjusted Modulus of Subgrade Reaction = **457.2** psi/in

Apply Adjustments

Depth of Rigid Foundation =

Loss of Support (0, 1, 2, or 3) =

Adjusted Modulus of Subgrade Reaction = **457.2** psi/in

Figura 36 Evaluación del módulo de Reacción de la Subrasante

Todos estos datos los toma el programa y resolvemos para el espesor de la losa, lo cual nos da un resultado de 10.28 pulgadas \approx 30 cm y es de esta manera como se obtiene el diseño de la estructura de pavimento por el método de AASHTO 93.



Figura 37 Estructura de pavimento de concreto hidráulico

4.2.2 Diseño 2

Datos de entrada generales para WinPass	
Espesor estimado de la base (pulgadas)	8
Serviciabilidad final (m/km)	2.5
Periodo de diseño	20 años
Tasa de crecimiento	3%
Factor de distribución por dirección.	50 %
Factor de distribución por carril.	90 %
Número total de ESAL´s	27,608,125
Confiabilidad	90%
• Módulo de ruptura (losa de concreto)	45 kg/cm2 (640 psi)
Módulo de elasticidad del concreto	4, 320,000 psi.
• Coefficiente de transferencia de carga	2.7
• Tipo de base	Granular
Módulo de reacción (K) de subrasante (PSI/in)	457.2 pci
Serviciabilidad inicial, Pi	4.5
Serviciabilidad final, Pi	2.5
Calidad de drenaje	Buena
coeficiente de drenaje	1.05

Tabla 18 Datos de entrada generales para el diseño 2

La mayoría de los datos de diseño son los mismos, pero en esta ocasión utilizamos un esfuerzo a flexión de 640 PSI (45.0 Kg/cm²), y por lo tanto un Módulo de Elasticidad de 4,320,000 PSI como lo vemos a continuación:

The screenshot shows a software window titled "Concrete Pavement Design". It contains two main sections: "Concrete Pavement Design/Analysis Inputs" and "Concrete Pavement Design/Analysis".

Parameter	Value	Unit
Concrete Thickness	9.95	inches
Total Rigid ESALs	27,608,125	
Reliability	90.00	%
Overall Standard Deviation	0.35	
Flexural Strength	640.0	psi
Modulus of Elasticity	4,320,000.0	psi
Load Transfer Coefficient	2.70	
Modulus of Subgrade Reaction	457.2	psi/in.
Drainage Coefficient	1.05	
Initial Serviceability	4.50	
Terminal Serviceability	2.50	

Buttons: "Save and Close", "Help", "Solve For".

Output: "Concrete Thickness: 9.95 inches"

Figura 38 Diseño de pavimento de concreto hidráulico

El resultado para el espesor de la losa, nos da un resultado de 9.95 pulgadas \approx 25 cm.



Figura 39 Estructura de pavimento de concreto hidráulico

4.2.3 Diseño 3

El diseño 3 comprende una prueba de estructura de pavimento utilizando una base estabilizada con materiales cementantes y usando los datos que vemos a continuación:

Datos de entrada generales para WinPass	
Espesor estimado de la base (pulgadas)	8
Serviciabilidad final (m/km)	2.5
Periodo de diseño	20 años
Tasa de crecimiento	3%
Factor de distribución por dirección.	50 %
Factor de distribución por carril.	90 %
Número total de ESAL's	27,608,125
Confiability	90%
• Módulo de ruptura (losa de concreto)	42 kg/cm² (600 psi)
Módulo de elasticidad del concreto	4, 050,000 psi.
• Coefficiente de transferencia de carga	2.7

• Tipo de base	Cementada
Módulo de reacción (K) de subrasante (PSI/in)	995.0 pci
Serviciabilidad inicial, Pi	4.5
Serviciabilidad final, Pi	2.5
Calidad de drenaje	Buena
coeficiente de drenaje	1.05

Tabla 19 Datos e entrada generales para el diseño 3

En el programa hacemos el cambio de material de subbase y por ser una subbase con material cementante obtenemos un Módulo resiliente de 750,000 y luego calculamos el nuevo valor del Módulo de reacción de la subrasante:

Help Screen for Modulus of Subgrade Reaction

Material Type	Resilient Modulus (psi) (1 MPa = 145 psi)
Lean Concrete Subbase (LCB, Econcrete)	1,000,000-2,000,000
Cement-Treated Subbase (CTB)	500,000-1,000,000
Hot-Mix or Warm-Mix Asphalt Subbase	350,000-1,000,000
Cement-Stabilized Subgrade	50,000-1,000,000
Asphalt-Treated Subbase (ATB)	40,000-300,000
Lime-Stabilized Subgrade	20,000-70,000
Unstabilized Subbase	15,000-45,000
Fine-Graded or Natural Subgrade	3,000-40,000

Resilient Modulus of the Subgrade = psi

Calculate Using AASHTO 93 Method Enter Value psi/in

Resilient Modulus of the Subbase = psi (Leave blank if none)

Subbase Thickness (4 to 12 inches) = inches

Unadjusted Modulus of Subgrade Reaction = **1.0** psi/in

Depth of Rigid Foundation =

Loss of Support (0, 1, 2, or 3) =

Adjusted Modulus of Subgrade Reaction = **997.9** psi/in

Figura 40 Cálculo del módulo de reacción en la subrasante

Se realiza el proceso de diseño:

Parameter	Value	Unit
Concrete Thickness	9.58	inches
Total Rigid ESALs	27,608,125	
Reliability	90.00	%
Overall Standard Deviation	0.35	
Flexural Strength	600.0	psi
Modulus of Elasticity	4,050,000.0	psi
Load Transfer Coefficient	2.70	
Modulus of Subgrade Reaction	995.0	psi/in.
Drainage Coefficient	1.05	
Initial Serviceability	4.50	
Terminal Serviceability	2.50	

Concrete Thickness: 9.58 inches

Figura 41 Diseño del pavimento de concreto hidráulico

El resultado para el espesor de la losa, nos da un resultado de 9.58 pulgadas \approx 25 cm.



Figura 42 Estructura de pavimento de concreto hidráulico

4.3 DISEÑO POR MEDIO DE LA ALTERNATIVA MECANICISTA – EMPIRICA.

Este método se encarga de diseñar y evaluar el comportamiento de la estructura del pavimento y analizar el deterioro que tendrá a lo largo del periodo de diseño, de esta manera estamos comprobando que el pavimento idealmente y en condiciones normales no sufra daños significativos durante el periodo que se estime de vida del pavimento.

4.3.1 DISEÑO 1

Siguiendo los pasos de la alternativa de diseño en el que está basado el análisis mecanicista - empírico, se debe hacer un pre-diseño y para esto se utiliza el que ya se realizó por el método AASHTO 93, el cual para el diseño 1 da un resultado de 30 cm de espesor de losa y 20 cm de espesor de subbase granular con un módulo de ruptura de 42 kg/cm². Con estos valores podemos hacer el análisis de comportamiento estructural de pavimento. Para realizar el análisis estructural como ya se mencionó antes haremos uso del programa de elementos finitos Ever Fe 2.24.

Diseño 1 (Iteración 1)

Datos generales de entrada.

DATOS GENERALES DE ENTRADA PARA DISEÑO 1	
PARAMETRO	DATO
LOSA	
Longitud	4.00 m
Ancho	3.5 m
Espesor	30 cm
Módulo de Ruptura (MR)	4.2 MPa
Módulo de Elasticidad (E)	28,321.67 MPa
Coefficiente de Poisson (nu)	0.20
Coefficiente de expansión térmica	1.1 e ⁻⁵
SUB BASE	
Tipo de sub base	Granular
Módulo de elasticidad de subbase	125.87 MPa
Coefficiente de Poisson base	0.35
SUB RASANTE	
K	0.125 MPa/mm
Dovelas	
E dovelas	200000 MPa
nu Dovelas	0.30
Configuración de Losas	Para probar con confinamiento se consideró un tablero de 6 losas dos columnas y tres filas

Tabla 20 Entrada general de parámetros de diseño para análisis estructural

Una vez que se tienen los datos generales de entrada se procede a realizar el análisis estructural del pavimento, a continuación se presenta el ingreso de los datos evaluando tres condiciones críticas de carga en la estructura de pavimento: Borde, esquina y centro; esto para los cuatro tipos de ejes de carga de rueda considerados en el análisis (simple, dual, tándem y tridem).

A continuación se presenta la forma en la que se ingresaron los datos.

GEOMETRY (GEOMETRIA)

Se presenta el arreglo de **6 losas** seleccionado entre una variedad de arreglos o combinaciones posibles presentado en este caso hemos utilizado para la losa 3.5 m de ancho y 4.0 m de largo, la losa se cargara de 3 maneras que son centro, esquina y borde, para ejemplo se presenta el caso de la losa cargada en el centro para un eje tándem.

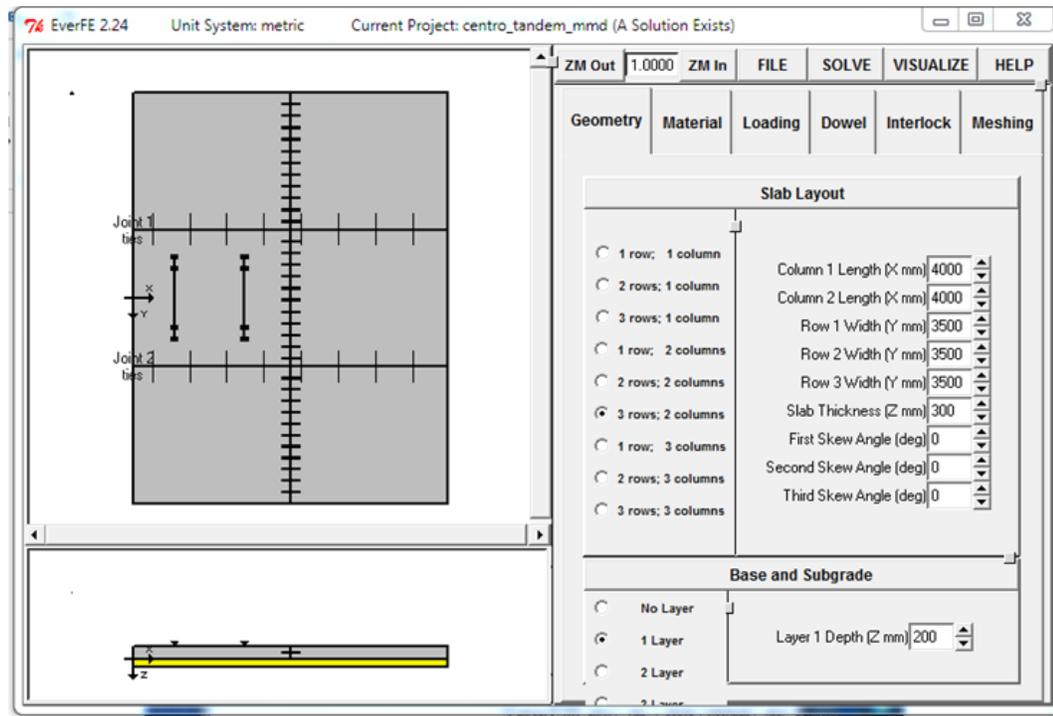


Figura 43 Parámetros geométricos del pavimento a diseñar

MATERIALES

La ventana MATERIALES permite el ingreso de datos respecto a las propiedades de los materiales para las losas de concreto, dovelas, las capas de base o Sub base, la fundación líquida densa, y la interfaz de losa-base.

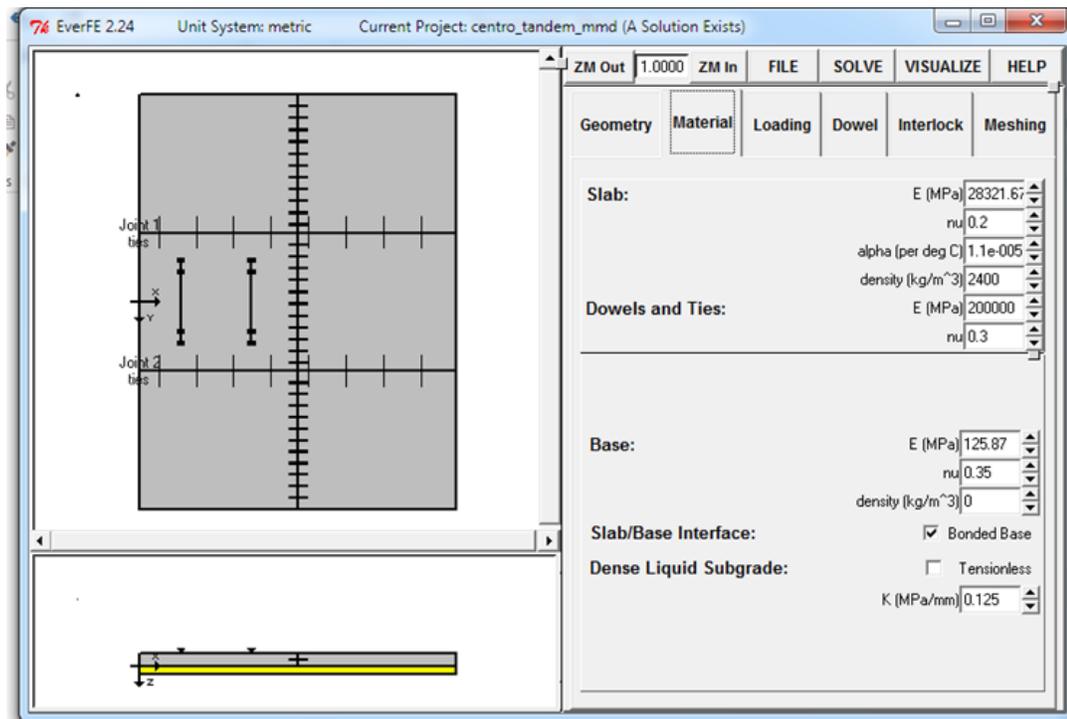


Figura 44 Panel de entrada de propiedades mecánicas y estructurales de los materiales de la estructura de pavimento rígido

CARGAS (LOADING)

Esta ventana permite la definición de las cargas de tráfico y de temperatura a las cuales estará expuesto el pavimento. Se han considerado los cuatro ejes de carga localizados en puntos críticos (centro, borde, esquina).

Los parámetros geométricos **A**, **B**, **L**, **W** y **S** se detallan en el gráfico EverFE. Los **X** y **Y**. Los valores son las distancias desde el modelo de origen de coordenadas hasta el centro de gravedad del eje.

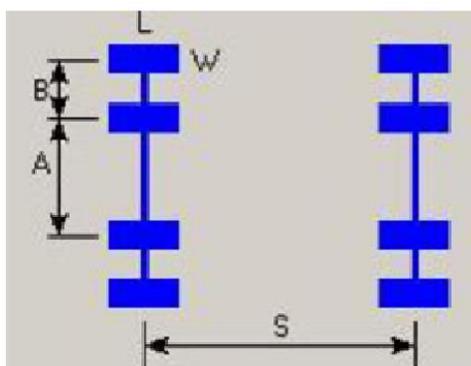


Figura 45 Parámetros geométricos de los ejes de rueda, eje tándem

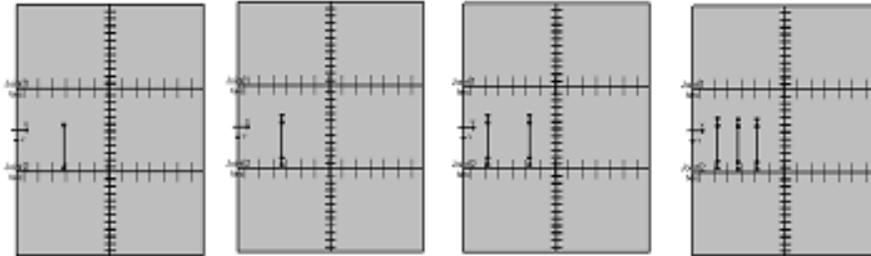
Las cargas de ejes empleadas proceden de los espectros de carga presentados en el capítulo 3 de esta investigación para los picos del espectro simple, dual, tándem y tridem, y convertidos a unidades de KN

Los parámetros geométricos de los ejes empleados se muestran a continuación:

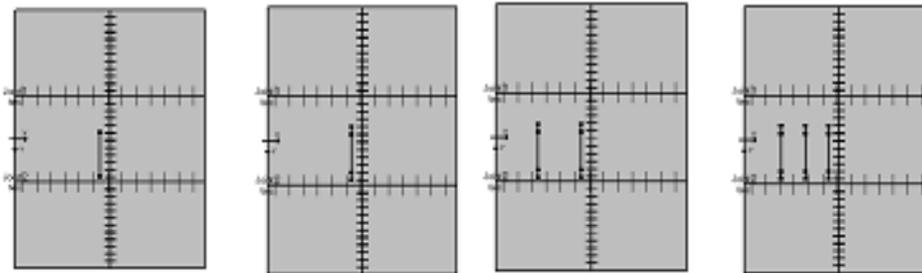
PARAMETROS GEOMETRICOS DE EJES DE RUEDA				
	SIMPLE	DUAL	TANDEM	TRIDEM
A	1500 mm	1500 mm	1500 mm	1500 mm
B	350 mm	350 mm	350 mm	350 mm
L	200 mm	200 mm	200 mm	200 mm
W	150 mm	150 mm	150 mm	150 mm
S			1250 mm	1250 mm
CARGA(KN)	50	100	154	194

Tabla 21 Parámetros geométricos de ejes de ruedas

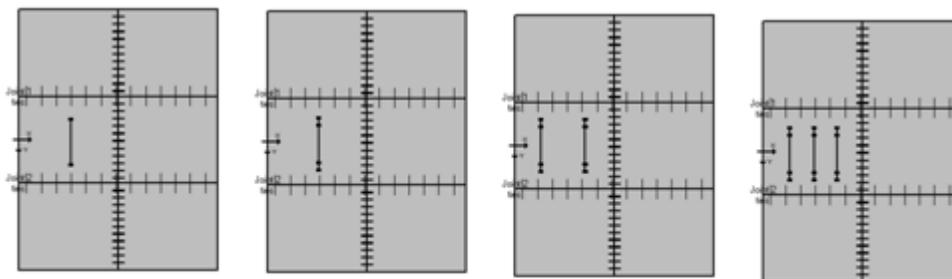
LOCALIZACIÓN DE EJES EN EL SISTEMA DE LOSAS PROPUESTO



BORDE



ESQUINA



CENTRO

Figura 46 configuraciones de localización de ejes para el análisis de esfuerzos

En la siguiente figura se presenta como se ingresaron los datos de cargas tanto para tráfico como para la carga originada por la temperatura a las que el pavimento estará expuesto para el análisis, en este punto se utilizaron los valores de espectros de carga obtenidos en el capítulo anterior para nuestro país, de manera que en donde corresponde el ingreso de la carga para la condición a evaluar se colocó el mayor valor de carga obtenido en el análisis espectral para ese tipo de eje.

Asimismo, las distribuciones térmicas que se pueden especificar son Lineal, bilineal y triliteral. Esto se logra al dar el número de cambios de temperatura (2, 3 o 4), y especificando su valor. El esfuerzo en cualquier punto se calcula como el producto del coeficiente de expansión térmica y el cambio de temperatura en ese punto. Los cambios de temperatura se supone que es lineal a través del espesor de la losa de arriba a abajo. Para la realización de la modelación en este caso partiremos de encontrar los cambios de temperatura en la superficie tomado las temperaturas mayores obtenidas en el ensayo de madures para una carretera de San Salvador, teniendo así el primer delta de temperatura el cual es $\Delta T_1 = -7^\circ\text{C}$, y para el fondo de la losa obtuvimos un valor de $\Delta T_2 = -6^\circ\text{C}$.

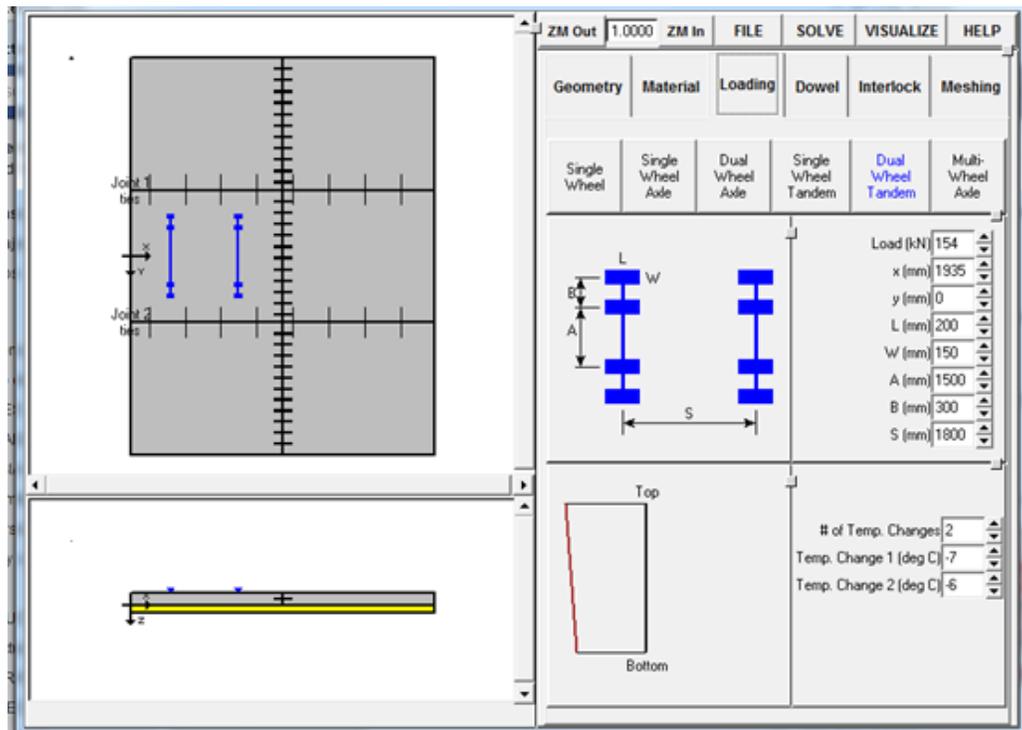


Figura 47 Panel de entrada de cargas de tráfico, características geométricas de eje de rueda y cargas originada por el gradiente de temperatura actuante en la losa. Eje Tándem

PASADORES (DOWEL)

Se modelan losas con transferencia de carga. La ventana DOWEL permite la descripción de las propiedades las dovelas con los siguientes parámetros

- Módulo de soporte de losa-dovela; la cual es una rigidez de resorte distribuido, y puede ser considerado como el producto de la "módulo

de soporte de dovelas" comúnmente utilizado, el valor predeterminado es de 1,000 Mpa.

El diámetro de la dovela considerado es 38 mm para espesor de losa de 30 cm colocadas cada 30 cm. Para el espesor de 25 cm evaluado el diámetro de dovela usado fue de 32 mm cada 30 cm

- Módulo de retención del sistema módulo losa-dovela es también una rigidez de resorte distribuido y controla el grado de deslizamiento horizontal relativo entre las barras y las losas. El valor predeterminado es 0 MPa.

-

La siguiente tabla ofrece configuraciones de dovelas de acuerdo a espesores de pavimentos rígidos:

CONFIGURACION DE DOVELAS			
ESPESOR DEL PAVIMENTO (CM)	DIAMETRO DE LA BARRA (CM)	LONGITUD (CM)	SEPARACION ENTRE CENTRO (CM)
10	1.27	25	30
11-13	1.90	30	30
14-15	1.91	35	30
16-18	2.22	35	30

19-20	2.54	35	30
21-23	2.86	40	30
24-25	3.18	45	30
26-28	3.49	45	30
29-30	3.81	50	30

Tabla 22 Disposición de dovelas en la estructura de pavimentos. Fuente PCA

Determinación de cantidad y separación de pasadores

El área requerida de acero de anclaje requerida por pie de la junta se calcula con la siguiente expresión:

$$A_s = \frac{W * b * f_a}{f_s}$$

Donde W = peso del pavimento (lb/pie²) (12.5 * espesor de losa en pulgadas)

b = Distancia entre la junta analizada y la siguiente junta libre o borde del pavimento.

f_a = Coeficiente de fricción = 1.5

f_s = Esfuerzo admisible del acero, psi

El espaciamiento de varillas:

$$S = A * \frac{12}{A_s}$$

A = Area de la sección transversal de la varilla, en pulgadas cuadradas.

Considerando var #4= 0.20 plg²

As= area de acero requerida por pie de junta

Longitud de varillas:

$$L = \left[2 * fs * \frac{A}{350 * P} \right] + 2$$

L = longitud de varillas

P=perímetro de la varilla, en pulgadas, considerando varilla #4 = 1.57 plg

Usando esas fórmulas, se puede determinar las dimensiones de las barras de amarre usar para diferentes espesores:

Espesor(cm)	W (lb7pie2)	As	S(plg)	L(plg)	S(cm)	L(cm)
25	123.03	0.05	45.31	31.12	115.09	79.038
26	127.95	0.06	43.57	31.12	110.69	79.038
27	132.87	0.06	41.96	31.12	106.56	79.038
28	137.80	0.06	40.46	31.12	102.76	79.038
29	142.72	0.06	39.06	31.12	99.21	79.038
30	147.64	0.06	37.76	31.12	95.91	79.038

Tabla 23 Dimensiones usadas para pasadores

Para el diseño y evaluación inicial, se colocarán varillas pasadores de 1/2" cada 95 cm con una longitud de barra de 80 cm. (esto para un espesor de losa de 30 cm) Estas barras no se deben insertar a menos de 40 cm de las juntas transversales para evitar que interfieran con el movimiento de las losas.

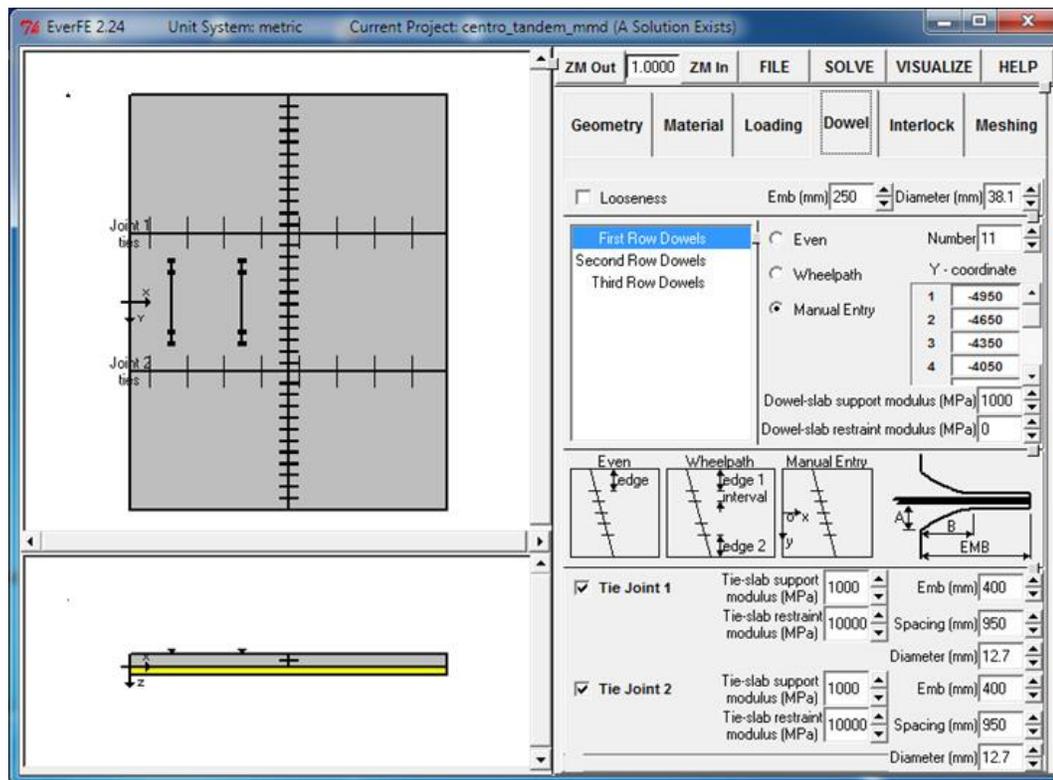


Figura 48 Panel de modelado de dovelas y pasadores en el proceso iterativo. Primera iteración.

INTERLOCK (TRABAZÓN DE AGREGADOS)

Se presentan dos opciones básicas para definir el comportamiento de trabazón de agregado en las juntas transversales: un modelo lineal, y un modelo no lineal. Cualquiera de estas opciones se selecciona con la casilla correspondiente en la parte superior del panel; el modelo por defecto es lineal.

Al escoger el modelo de trabazón de agregados lineal debe indicarse un valor único para la rigidez de juntas, parámetro que se aplica para cada junta transversal en el modelo de elementos finitos. Además, se debe especificar una abertura de la junta independiente para cada junta transversal en el modelo (apertura entre la Columna 1 y Columna 2;). Los valores empleado en este análisis para rigidez en la junta es el valor predeterminado de cero y la apertura de las juntas será de 0.5 mm.

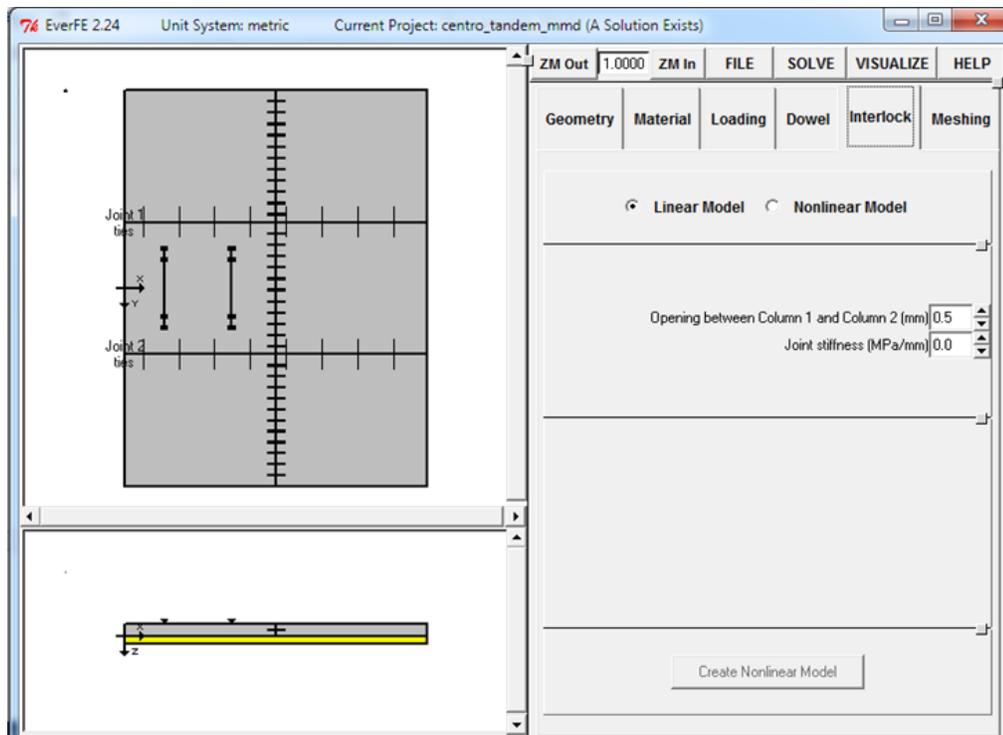


Figura 49 Ventana de definición del modelo de trabazón de agregados considerado en el análisis de esfuerzos

MESHING (MALLADO)

EverFe permite especificar de forma independiente el número de divisiones de elementos en cada fila y columna puede ser muy útil cuando se modelan losas que no sean de interés primordial, ya que con menos elementos para estas partes del modelo pueden ahorrar tiempo de cálculo significativo. El mallado estará en función de que tan detallado se requiere el análisis.

También proporciona un estimado de la cantidad de memoria necesaria para una simulación dada, y debe ser menor que la memoria RAM disponible durante toda la simulación y análisis.

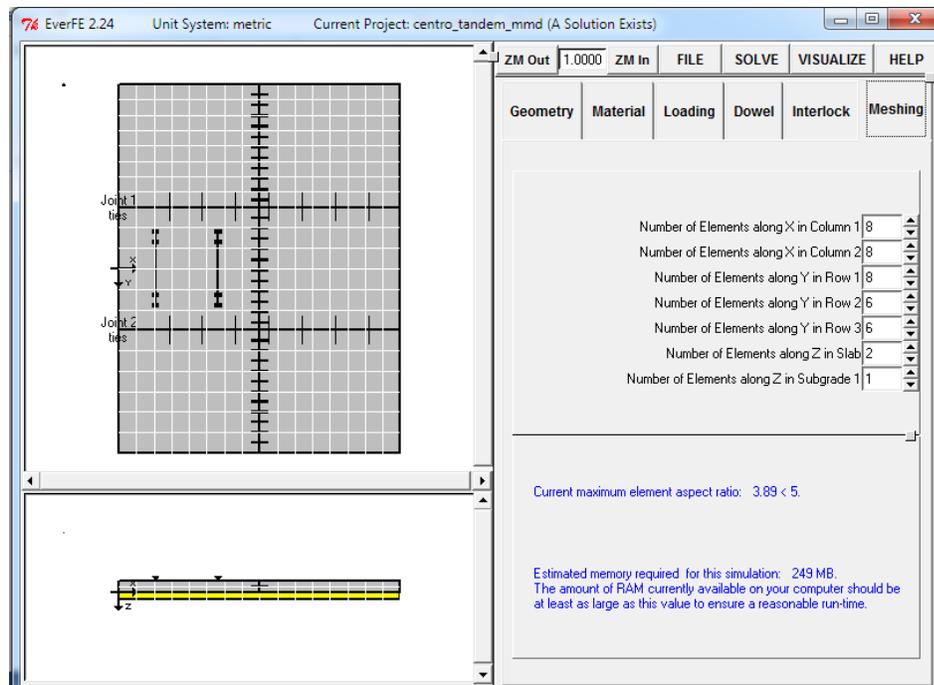


Figura 50 Panel de configuración del mallado para el análisis de esfuerzos actuantes en las losas

Una vez se ha realizado el ingreso total de los datos, se procede a realizar el análisis.

Podemos conocer también los esfuerzos en cada punto coordenado dentro de la losa seleccionando la opción **Resultados por puntos**. Así se pueden conocer los esfuerzos principales actuantes en la estructura de pavimento.

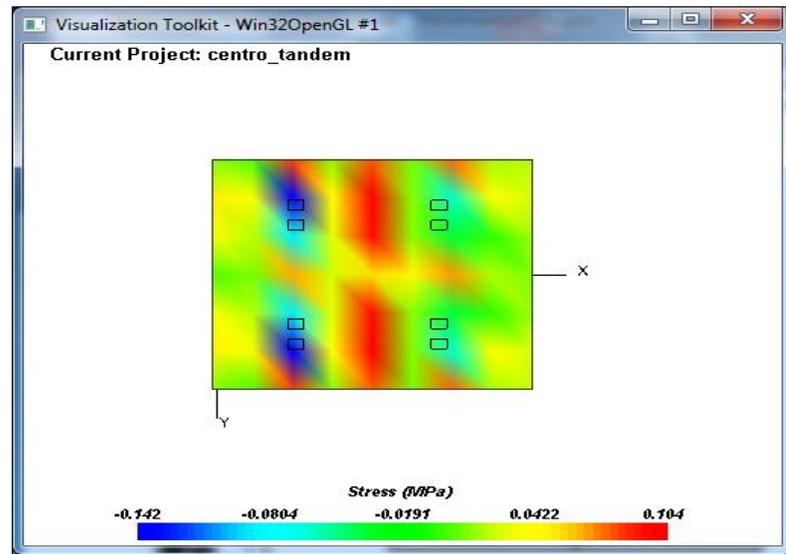


Figura 51 Evaluación en la primera iteración en la losa cargada en esquina con eje tridem. Representación cromática

Además se pueden conocer los desplazamientos que ocurren en la losa, esto tomando en cuenta la carga aplicada por la temperatura hacia la losa.

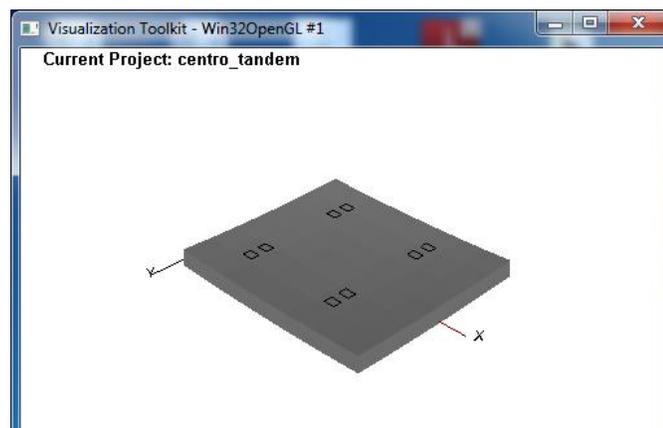


Figura 52 Vista de los desplazamientos sufridos por la losa según las condiciones de carga impuestas

Se ha tomado como parámetro de evaluación estructural para este análisis **un esfuerzo máximo en la losa no superior al 50% del módulo de ruptura.** Esto implica que el máximo esfuerzo que debe admitirse en las losas debe ser de 2.1 Mpa para el Modulo de Ruptura de 4.2 MPa considerado en este análisis. Para este efecto, se realizan procesos iterativos a fin de determinar los espesores que permitan el cumplimiento de éste parámetro.

El diseño inicial realizado a través de WinPas12 ofreció un espesor de losa de 30 cm y una subbase GRANULAR de 20 cm. Esta configuración fue ejecutada para las condiciones de carga anteriormente mencionadas encontrándose esfuerzos inferiores al 50 %de Modulo de Ruptura por lo que se efectuó un proceso comparativo con un espesor menor, a fin de verificar estos resultados se toma el 50% del Módulo de rotura basados en el experimento de Bate (Clemmer, 1923) que un esfuerzo de flexión inducida podría ser repetida indefinidamente sin causar ruptura, siempre que la intensidad de esfuerzo en las fibras no exceda aproximadamente 50% del módulo de rotura del concreto. Análisis y Diseño de Pavimento, Yang H. Huang, Segunda Edición, pagina 7, párrafo 5.

En la siguiente figura se muestra la representación de la forma en la que se presentan los resultados obtenidos para esfuerzos máximos por losa, en donde se puede apreciar en qué posición están los esfuerzos en la losa, considerando

que el valor de z es positivo hacia abajo por tanto donde se encuentra el valor de 0.01 es en el fondo de la losa.

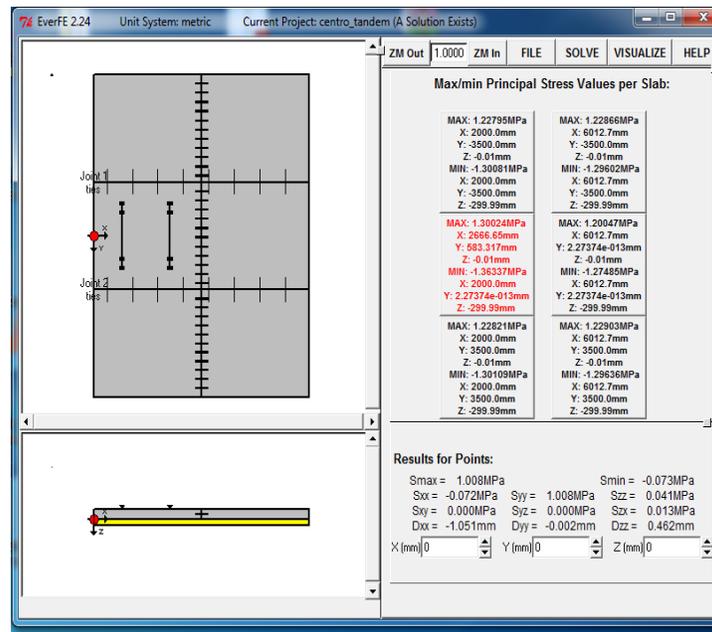


Figura 53 Presentación de resultados para esfuerzos obtenidos en losa

Para tener un mejor entendimiento de los resultados, se escogieron los esfuerzos que más influyen en la losa, es decir los que generan más daño y se presentan de la siguiente manera en las tablas:

ESFUERZO MAXIMOS DISEÑO 1 ITERACION 1

Esfuerzos evaluados para espesor de losa de 30 cm, subbase granular de 20

EJE SIMPLE			
ESFUERZOS PRINCIPALES ABSOLUTOS(MPa)			
	BORDE	ESQUINA	CENTRO
Fondo (tensión)	0.31	0.25	0.25
Superficie (compresión)	-0.36	-0.24	-0.26

EJE DUAL			
ESFUERZOS PRINCIPALES ABSOLUTOS(MPa)			
	BORDE	ESQUINA	CENTRO
Fondo (tensión)	0.56	0.45	0.59
Superficie (compresión)	-0.60	-0.43	-0.67

EJE TANDEM			
ESFUERZOS PRINCIPALES ABSOLUTOS(MPa)			
	BORDE	ESQUINA	CENTRO
Fondo (tensión)	0.39	0.38	0.36
Superficie (compresión)	-0.42	-0.48	-0.38

EJE TRIDEM			
ESFUERZOS PRINCIPALES ABSOLUTOS(MPa)			
	BORDE	ESQUINA	CENTRO
Fondo (tensión)	0.42	0.40	0.51
Superficie (compresión)	-0.43	-0.45	-0.55

Tabla 24 Esfuerzos evaluados

ANÁLISIS DE DETERIOROS

Como se menciona anteriormente el tercer control que se le debe realizar al pavimento por medio de la alternativa propuesta es la evaluación de los deterioros que va a sufrir el pavimento a lo largo de un determinado tiempo, dichos daños son:

- Despostillamiento
- Fisuras
- IRI

El cumplimiento de este requerimiento se realizara por medio del programa Hiper Pave, el cual es un soft ware de uso libre, con el que se puede verificar diferentes tipos de daños y compararlos con valores limites a soportar antes que el pavimento falle o este bajo condiciones de daños que deban ser reparadas.

A continuacion se presentan los datos generales de entrada utilizados para realizar el analisis de daño.

DATOS GENERALES DE ENTRADA PARA EL DISEÑO 1	
Parametro	Dato.
Analisis a Edad Temprana	
Confiabilidad	90%
Espesos de Losa	12 pulgadas
Espesor de base	8 pulgadas
Ancho	3.5 mts
Espacio entre juntas transversales	4.0 mts
Tipo de cemento	Tipo III
Tipo de agregado	Basalto
Cantidad de cenizavolante	< que el 7%
Tipo de esfuerzo	Esfuerzo al 3/2
Modulo de ruptura	600 PSI
Temperatura inicial	29°
Temperatura inicial entre capa superior e inife.	31°
Metodo de curado	Rociado de curador liquido
Edad de aplicación de curado	1 hora
Esfuerzo de apertura al trafico	420 PSI
Tipo de esfuerzo	Flexion al tercio medio
Temperatura	Estas temperatruas son las registradas ambiente promedio durante 3 dias.
Analisis a un determinado tiempo	
Periodo de diseño	20 años

IRI Inicial	2.5
Escalonamiento	3 mm
Fisuras transversales	5%
Fisuras longitudinales	5%
Maximo IRI permisible	5.5
Serviciabilidad	2.5
Esal's de Diseño	1,027,456

Tabla 25 Datos para el análisis de deterioros

Se ingresan los datos generales al programa como el nombre, identificación, etc.

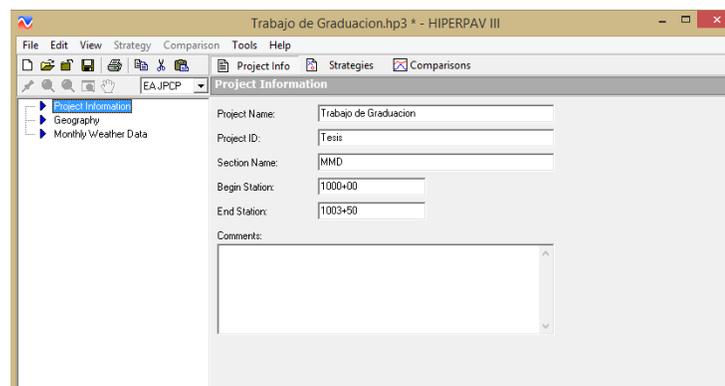


Figura 54 Datos generales

Luego se ingresaron los datos de precipitación como un promedio mensual, en este caso para San Salvador.

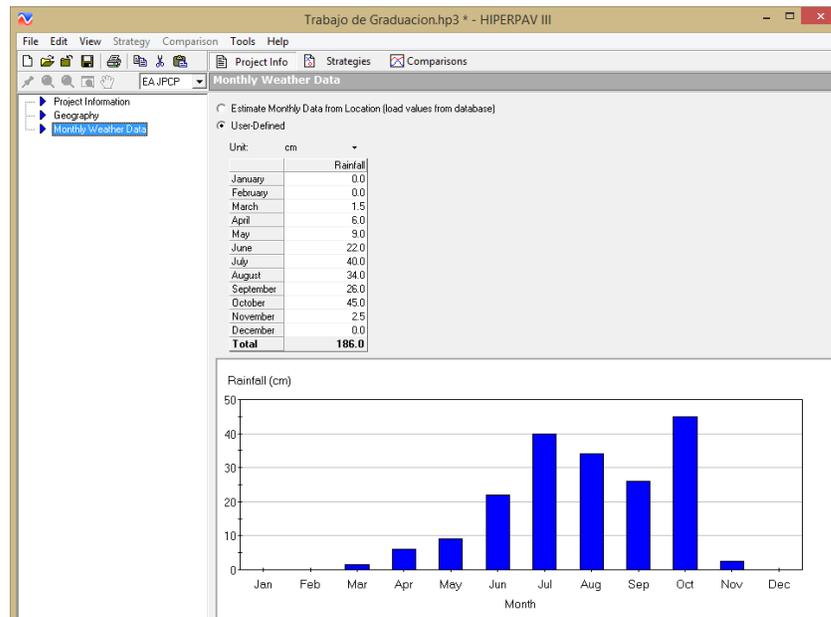


Figura 55 datos de precipitaciones

Se realiza un análisis a edad temprana donde se colocan los datos del diseño del pavimento, datos como el espesor de la losa y de la capa sub base, así como también el dimensionamiento de las losas, dichos datos fueron tomados del pre diseño que se realizó. Luego se colocan los datos para realizar la mezcla de concreto a usar, así como los datos de las juntas y de las dovelas.

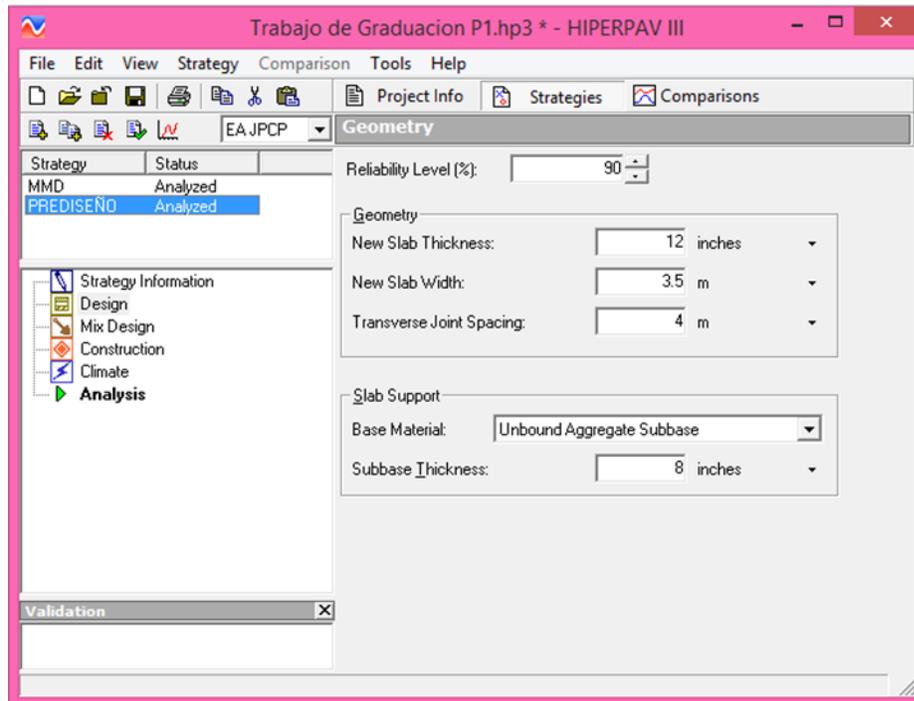


Figura 56 Datos de diseño

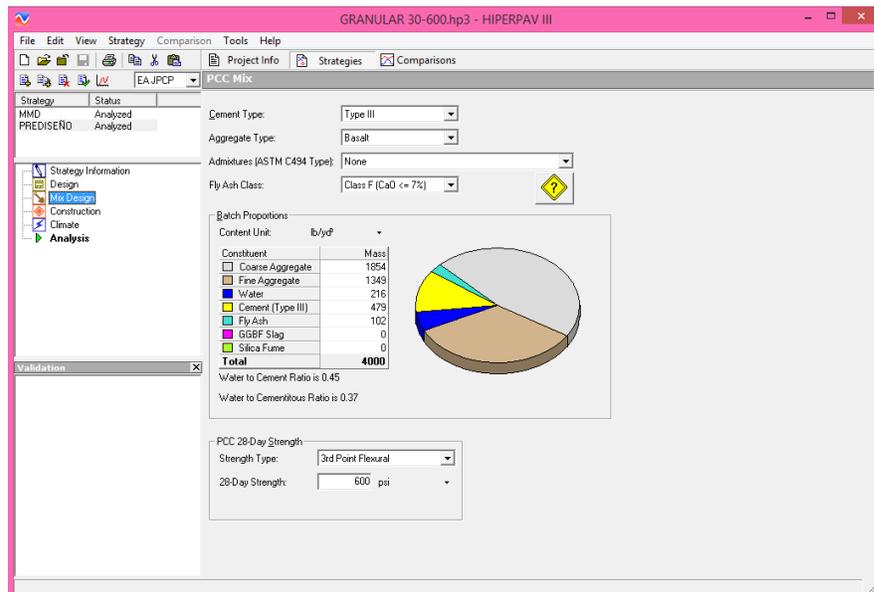


Figura 57 Diseño de mezcla

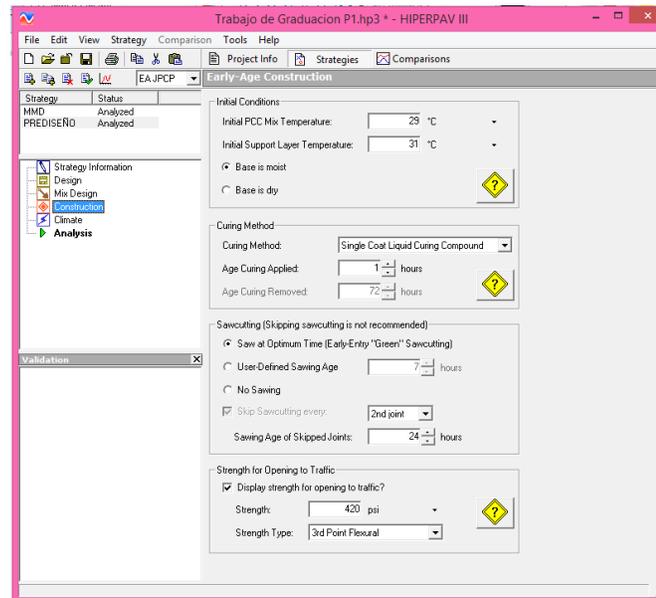


Figura 58 diseño constructivo

*Para evaluar las condiciones de temperatura ambiente a edad temprana en el pavimento se tomó un promedio de 6 meses según datos investigados.

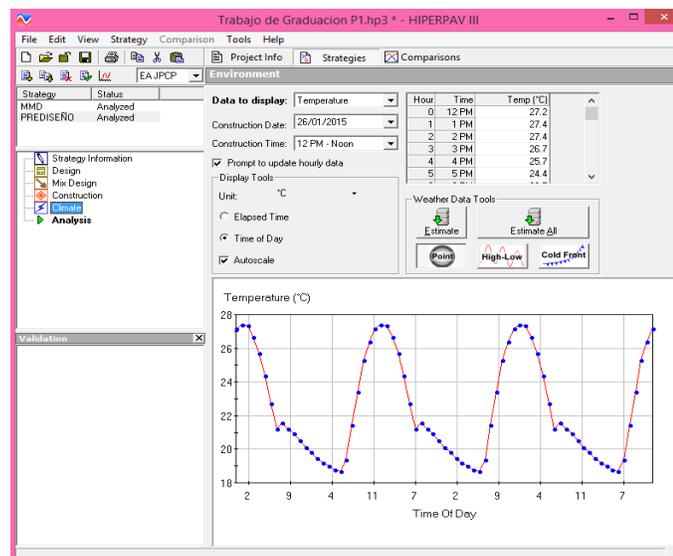


Figura 59 Condiciones climaticas
(Temperaturas horarias)

Se hace un análisis para revisar el desempeño del pavimento a edad temprana, la cual se presenta a continuación.

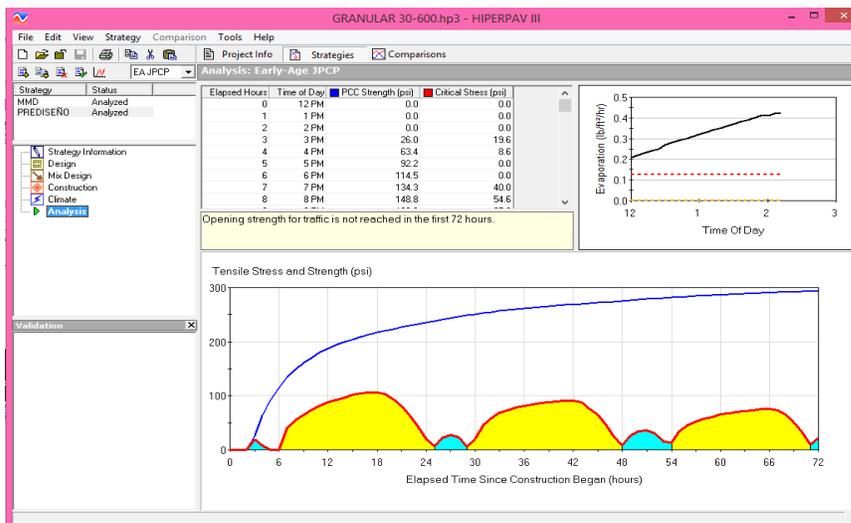


Figura 60 Análisis a edad temprana (72horas)

Análisis a un determinado tiempo después de construido el pavimento. Luego se hace una proyección del comportamiento del pavimento en el periodo de diseño que en nuestro caso es de 20 años y se colocan los parámetros de desempeño del diseño como se muestran a continuación. Los valores aceptables que utilizamos para el máximo de grietas transversales y grietas longitudinales es de 5%, el IRI máximo es del 5.5 m/km y el serviciabilidad mínima de 2.5 PSI, todos estos datos los tomamos del trabajo de graduación elaborado por el Ing. Pablo Emilio Sánchez Campos “VERIFICACION DE LA CONFIABILIDAD DE LOS MODELOS DE DETERIORO PARA PAVIMENTOS RIGIDOS EN EL SALVADOR”, Universidad de El Salvador-2014

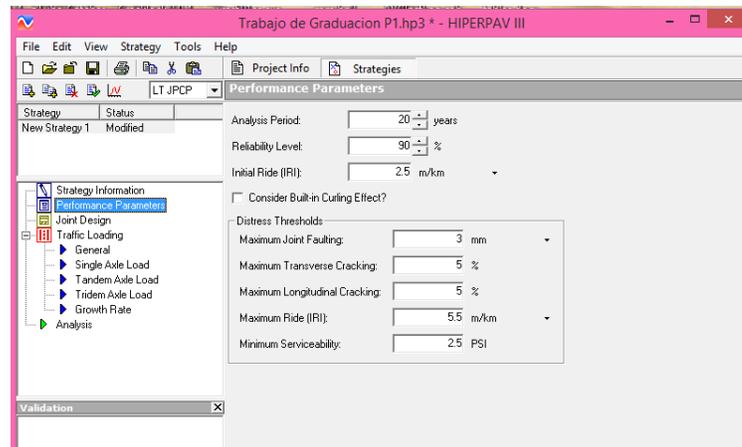


Figura 61 Parametros de desempeño

También es necesario colocar el diseño de dovelas a utilizar en el pavimento, para lo cual nos hemos basado en la tabla 4.4 “Disposición de dovelas en la estructura de pavimentos. Fuente ACPA”

Y se introducen los valores al programa.

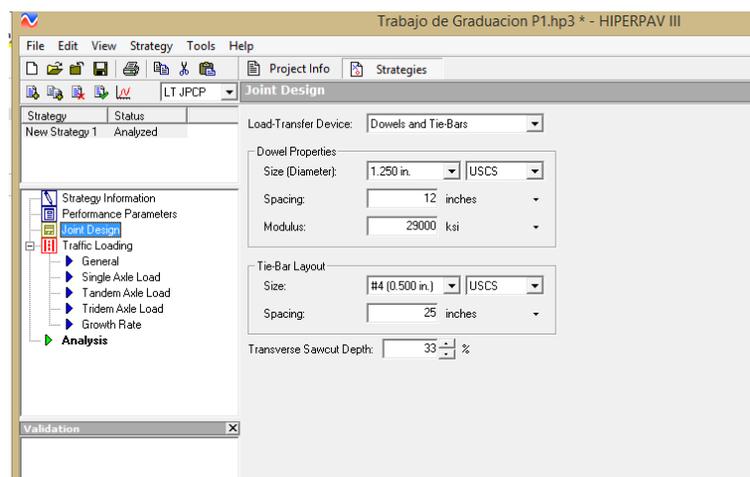


Figura 62 diseño de dovelas y barras de amare

Se utilizaron los Esal's de diseño que encontramos anteriormente y el programa de HiperPave hace un estimado de los espectros a utilizar.

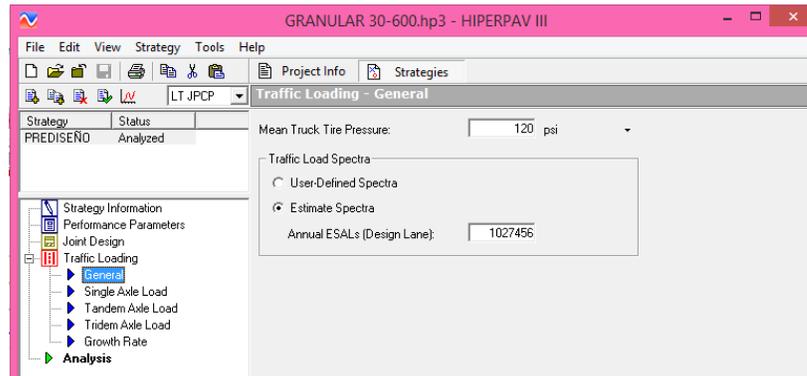


Figura 63 Esal's de diseño

Y el programa da un estimado de espectros de carga para ejes simples, tándem y tridem que mostramos a continuación.

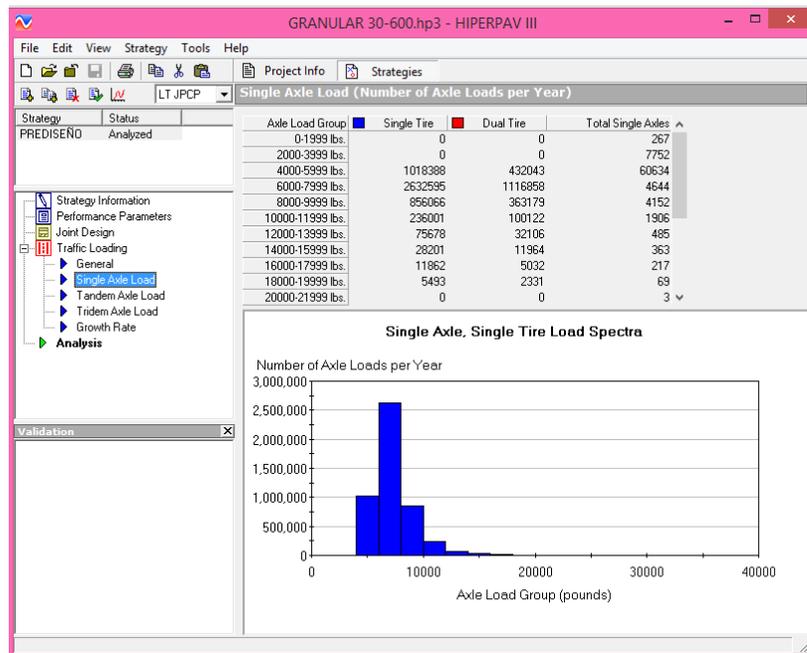


Figura 64 Espectro de carga del eje simple

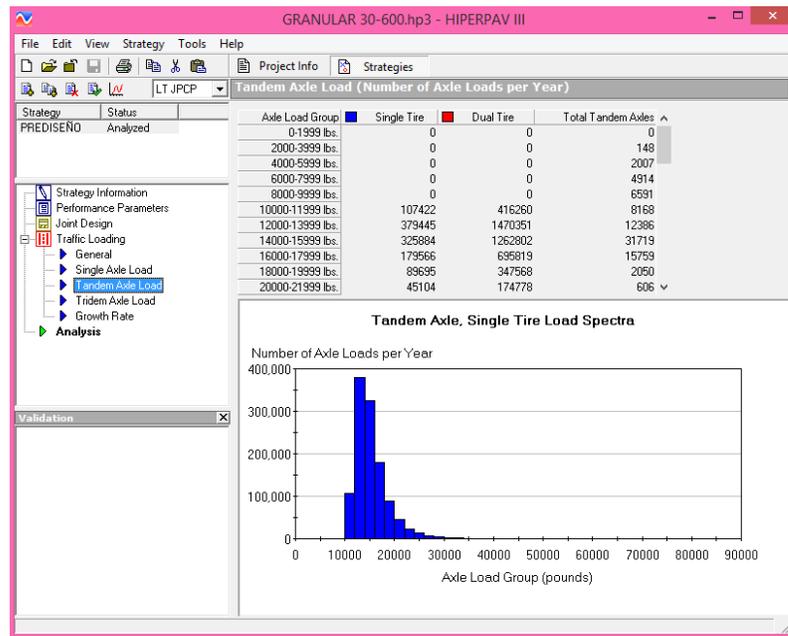


Figura 65 Espectro de carga de eje tándem

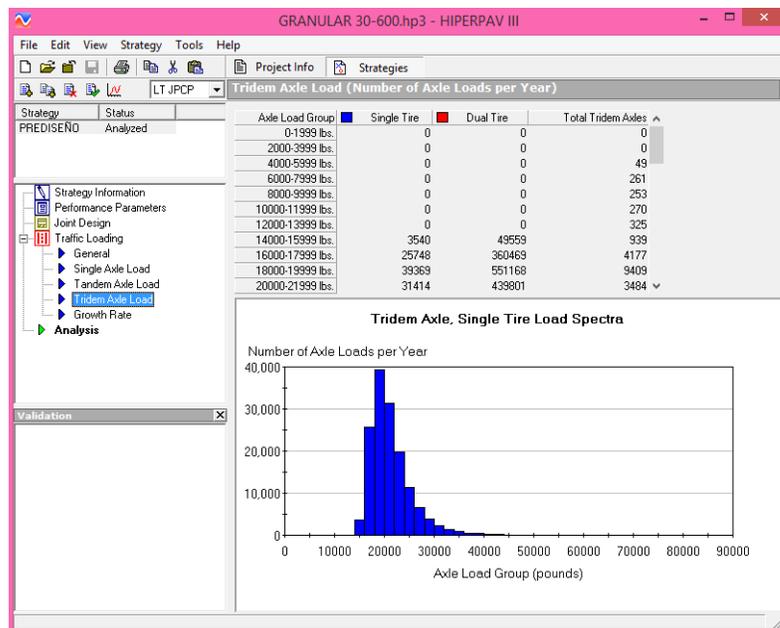


Figura 66 Espectro de carga de eje Tridem

La tasa de crecimiento anual se puede apreciar en la siguiente grafica

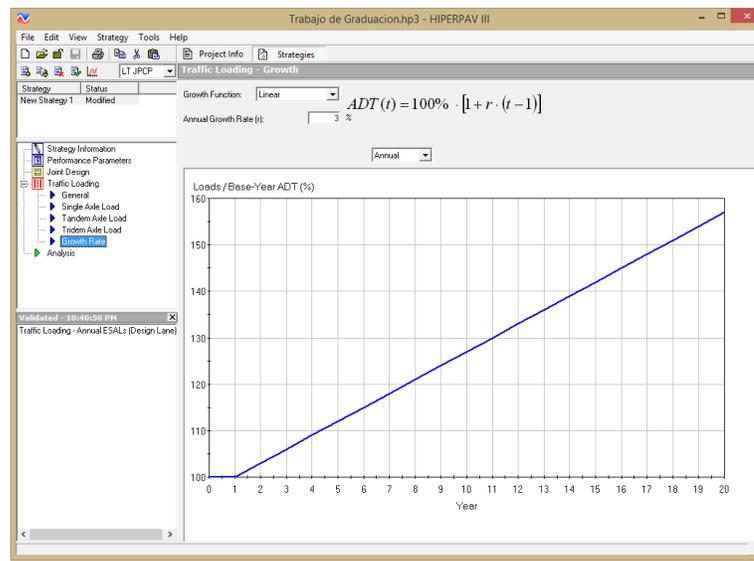


Figura 67 Tasa de crecimiento anual de 3%

Análisis de escalonamiento en juntas del pavimento, donde claramente se puede observar que en el pavimento no tiene un deterioro.

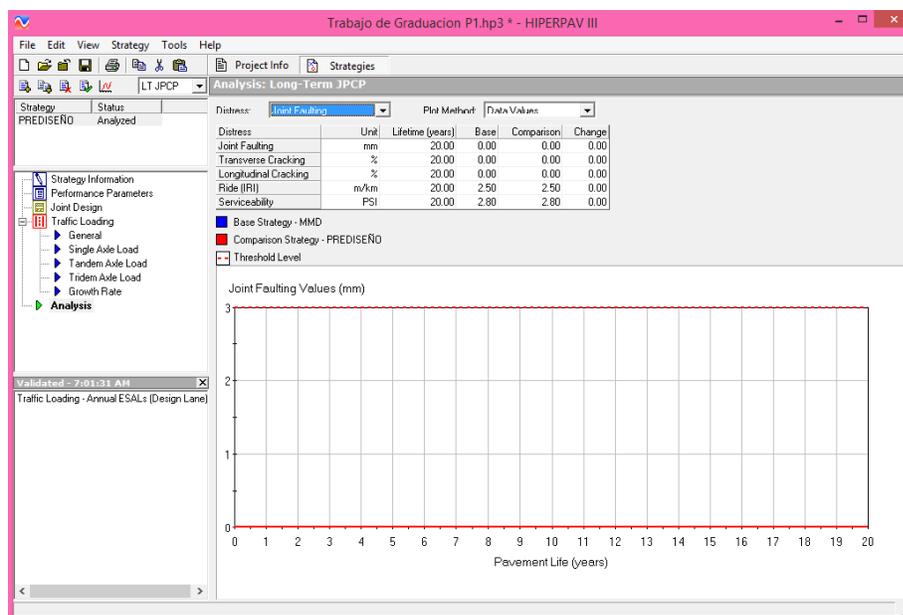


Figura 68 Analisis de deterioro: Escalonamiento

Análisis de agrietamiento transversal donde el pavimento no se agrietara a lo largo del periodo de diseño.

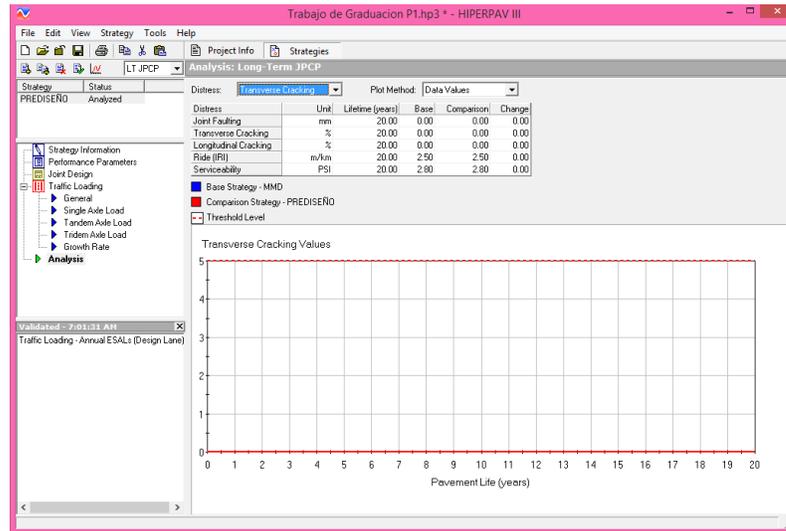


Figura 69 Análisis de deterioro: Agrietamiento transversal

Análisis de agrietamiento longitudinal, el pavimento no se agrietara.

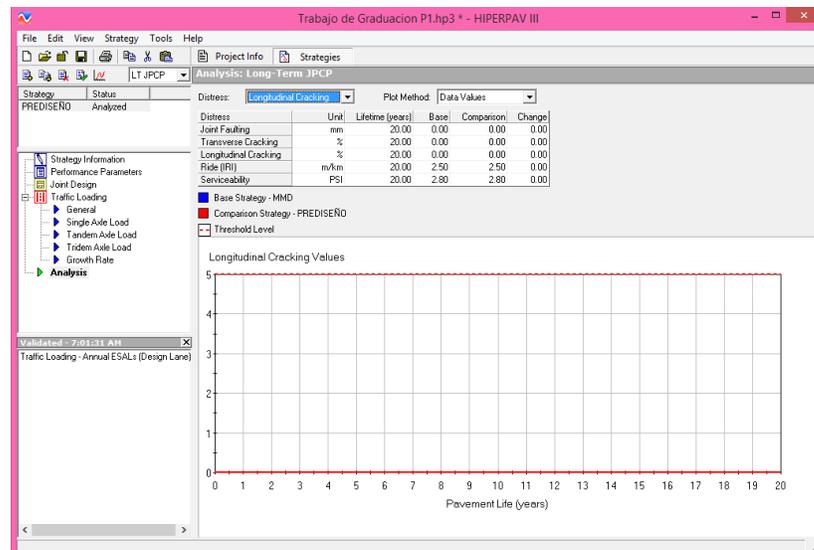


Figura 70 analisis de deterioro: agrietamiento longitudinal

Análisis del IRI es aceptable ya que no sobrepasa el límite.

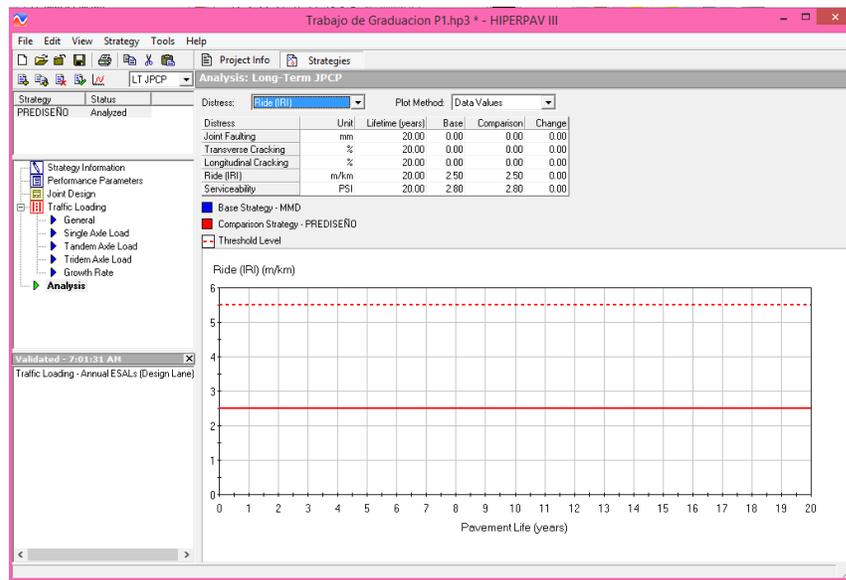


Figura 71 Analisis de deterioros IRI

Con los resultados obtenidos podemos observar que con un espesor de losa de 30 cm y un espesor de subbase granular de 20 cm, nuestro pavimento no se da a las cargas impuestas. Y por lo tanto la alternativa de diseño mecanicista-empírico para el diseño 1 cumple con todas las pruebas.

Diseño 1 (Iteración 2)

Para hacer una mejor verificación y tratar de optimizar la estructura del pavimento, se realiza una nueva prueba, con los mismos datos de diseño, pero variando el espesor de losa, esta nueva propuesta tiene 25 cm de espesor.

ESFUERZOS MAXIMOS DISEÑO 1 ITERACION 2

Esfuerzos evaluados para espesor de losa de 25 cm, subbase granular de 20

EJE SIMPLE			
ESFUERZOS PRINCIPALES ABSOLUTOS(MPa)			
	BORDE	ESQUINA	CENTRO
Fondo (tensión)	0.42	0.41	0.39
Superficie (compresión)	-0.49	-0.50	-0.45

EJE DUAL			
ESFUERZOS PRINCIPALES ABSOLUTOS(MPa)			
	BORDE	ESQUINA	CENTRO
Fondo (tensión)	0.8	0.69	0.82
Superficie (compresión)	-0.8	-0.81	-0.89

EJE TANDEM			
ESFUERZOS PRINCIPALES ABSOLUTOS(MPa)			
	BORDE	ESQUINA	CENTRO
Fondo (tensión)	0.57	0.57	0.60
Superficie (compresión)	-0.61	-0.69	-0.67

EJE TRIDEM			
ESFUERZOS PRINCIPALES ABSOLUTOS(MPa)			
	BORDE	ESQUINA	CENTRO
Fondo (tensión)	0.58	0.51	0.61
Superficie (compresión)	-0.61	-0.58	-0.65

Tabla 26 Esfuerzos evaluados en la prueba 2

ANÁLISIS DE DETERIORO (Diseño 1 Iteración 2)

Se colocan los nuevos datos como el espesor de losa de 25 cm y una subbase granular de 20 cm, usando un esfuerzo a la flexión siempre de 600 psi y luego se realizan de nuevo los análisis de deterioro para el periodo de diseño de 20 años.

Análisis de escalonamiento de juntas

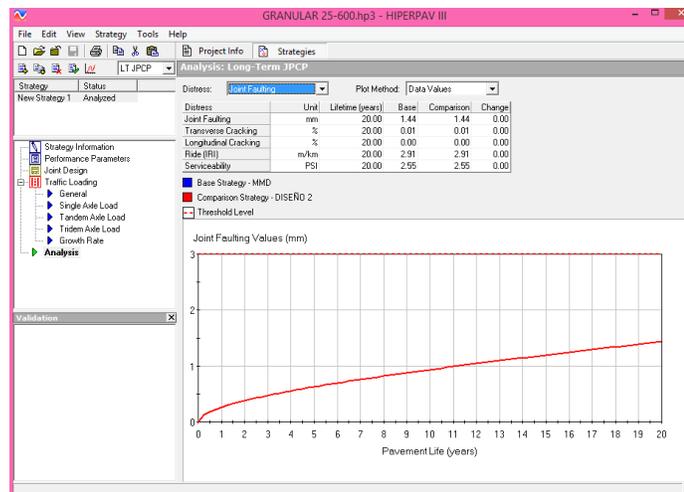


Figura 72 Analisis de deterioro :Escalonamiento

Análisis de agrietamiento transversal

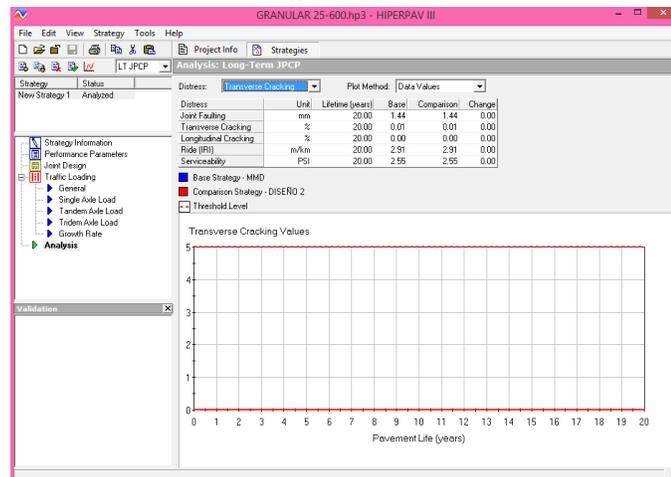


Figura 73 Análisis de deterioro: Agrietamiento transversal

Análisis de agrietamiento longitudinal

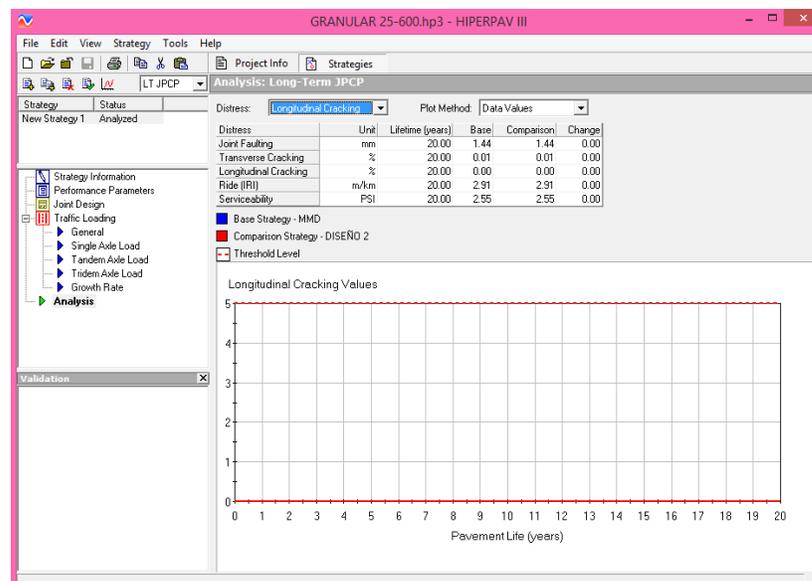


Figura 74 Análisis de deterioros: Agrietamiento Longitudinal

Análisis del IRI

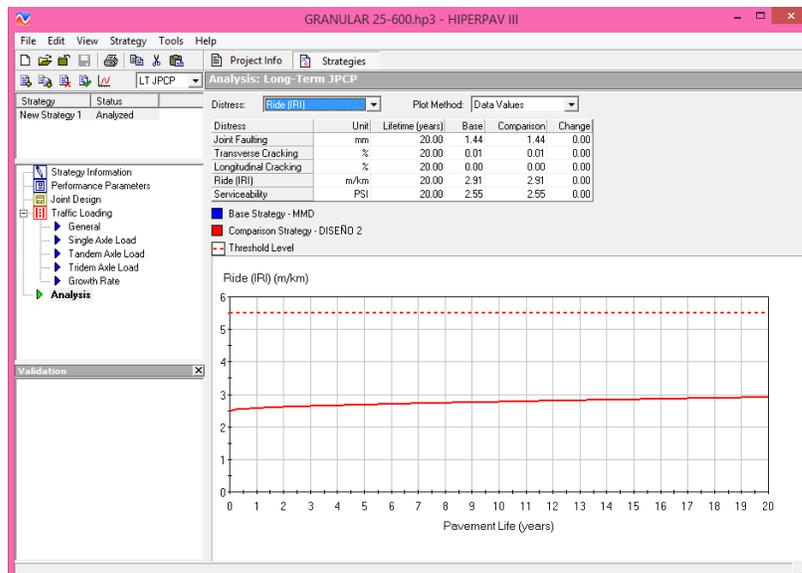


Figura 75 Analisis de deterioros :IRI

Este análisis queda completamente descartado ya que no cumple con los esfuerzos mínimos en el análisis estructural, por otra parte se reflejan deterioros del pavimento a edades tempranas, pero no sobrepasan el límite establecido.

Iteraciones que fueron realizadas en el análisis estructural para el diseño 1

ITERACIÓN	ESPEJOR DE LOSA (cm)	ESPEJOR DE SUBBASE GRANULAR (cm)	CUMPLIMIENTO DE PARÁMETRO DE ANALISIS ESTRUCTURAL Y DE DESEMPEÑO
1	30	20	Si
2	25	20	SI

Tabla 27 Iteraciones realizadas

4.3.2 DISEÑO 2

El diseño 2 da un resultado de 25 cm de espesor de losa y 20 cm de espesor de subbase granular con un módulo de ruptura de 45 kg/cm². Con estos valores se realiza el análisis de comportamiento estructural de pavimento como se muestra a continuación:

DISEÑO 2 (Iteración 1)

DATOS GENERALES DE ENTRADA PARA DISEÑO 2	
PARAMETRO	DATO
LOSA	
Longitud	4.00 m
Ancho	3.5 m
Espesor	25 cm
Módulo de Ruptura (MR)	4.5 MPa
Módulo de Elasticidad (E)	30209.79 MPa
Coefficiente de Poisson (nu)	0.20
Coefficiente de expansión térmica	1.1 e⁻⁵
SUB BASE	
Tipo de sub base	Granular
Módulo de elasticidad de subbase	125.87 MPa

Coefficiente de Poisson base	0.35
SUB RASANTE	
K	0.125 MPa/mm
Dovelas	
E dovelas	200000 MPa
nu Dovelas	0.30
Configuración de Losas	Para probar con confinamiento se consideró un tablero de 6 losas dos columnas y tres filas
NOTA: los datos utilizados para ingreso de cargas y pasadores de carga ver tablas de datos en diseño 1 valores constantes que no cambian para este diseño.	

Tabla 28 Entrada general e parámetros de diseño para análisis estructural

ESFUERZO MAXIMOS DISEÑO 2 (Iteración 1)

Esfuerzos evaluados para espesor de losa de 30 cm, subbase granular de 20, MR = 4.5 Mpa.

EJE SIMPLE			
ESFUERZOS PRINCIPALES ABSOLUTOS(MPa)			
	BORDE	ESQUINA	CENTRO
Fondo (tensión)	0.42	0.41	0.30
Superficie (compresión)	-0.50	-0.50	-0.45

EJE DUAL			
ESFUERZOS PRINCIPALES ABSOLUTOS(MPa)			
	BORDE	ESQUINA	CENTRO
Fondo (tensión)	0.82	0.70	0.77
Superficie (compresión)	-0.89	-0.82	-0.85

EJE TANDEM			
ESFUERZOS PRINCIPALES ABSOLUTOS(MPa)			
	BORDE	ESQUINA	CENTRO
Fondo (tensión)	0.52	0.47	0.59
Superficie (compresión)	-0.55	-0.53	-0.63

EJE TRIDEM			
ESFUERZOS PRINCIPALES ABSOLUTOS(MPa)			
	BORDE	ESQUINA	CENTRO
Fondo (tensión)	0.53	0.52	0.60
Superficie (compresión)	-0.53	-0.50	-0.64

Tabla 29 Esfuerzos evaluados en el diseño 2 iteración 1 para las condiciones de carga y eje descritos

ANÁLISIS DE DETERIOROS (Diseño 2 Iteración 1)

Este diseño comprende un pavimento hidráulico con subbase granular y una resistencia a flexión de 640 psi o 45 Kg/cm², los demás datos se detallan a continuación en la siguiente tabla:

DATOS GENERALES DE ENTRADA PARA EL DISEÑO 2	
Parametro	Dato.
Analisis a Edad Temprana	
Confiabilidad	90%
Espesos de Losa	25 pulgadas
Espesor de base	8 pulgadas
Ancho	3.5 mts
Espacio entre juntas transverrsales	4.0 mts
Tipo de cemento	Tipo III
Tipo de agregado	Basalto
Cantidad de cenizavolante	< que el 7%
Tipo de esfuerzo	Esfuerzo altercio medio
Modulo de ruptura	640 PSI
Temperatura inicial	29°
Temperatura inicial entre capa superior e einfe.	31°
Metodo de curado	Rociado de curador liquido
Edad de aplicación de curado	1 hora
Esfuerzo de apertura al trafico	420 PSI
Tipo de esfuerzo	Flexion al tercio medio
Temperatura	Estas temperatruas son las registradas ambiente promedio durante 3 dias.
Analisis a un determinado tiempo	
Periodo de diseño	20 años
IRI Inicial	2.5

Escalonamiento	3 mm
Fisuras transversales	5%
Fisuras longitudinales	5%
Maximo IRI permisible	5.5
Serviciabilidad	2.5
Esal's de Diseño	1,027,456

Tabla 30 Datos para el análisis de deterioros

Con los datos de entrada del diseño se pasa a analizar el comportamiento que tendrá la losa en un periodo de 20 años y los resultados se presentan a continuación en las siguientes graficas.

Análisis de escalonamiento de juntas

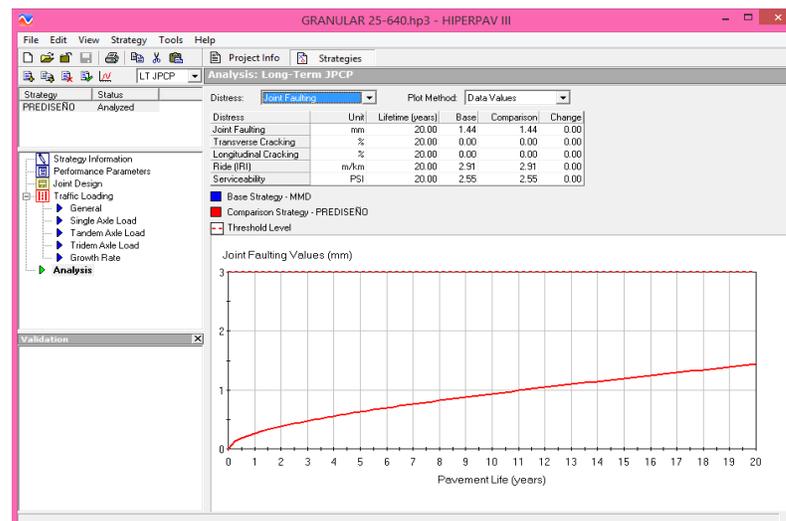


Figura 76 Analisis de Deterioro: Escalonamiento

Análisis de agrietamiento transversal

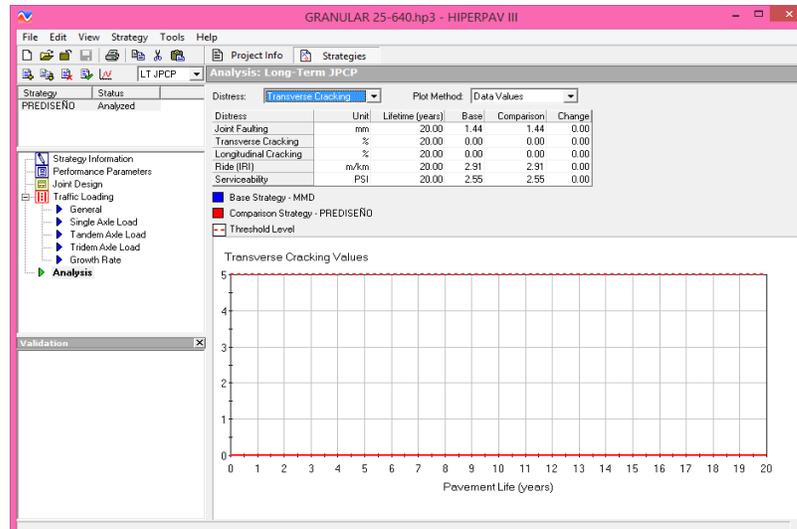


Figura 77 Análisis de deterioro: Agrietamiento transversal

Análisis de agrietamiento longitudinal

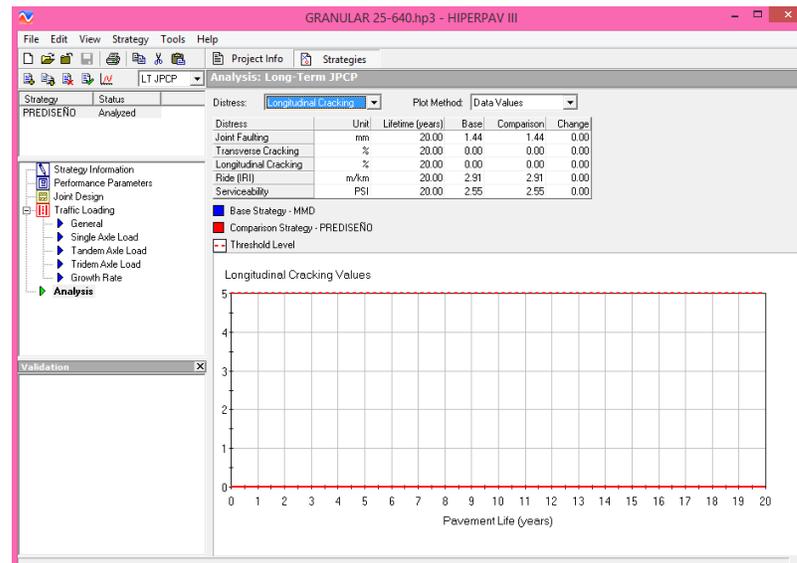


Figura 78 análisis de deterioro: Agrietamiento longitudinal

Análisis del IRI

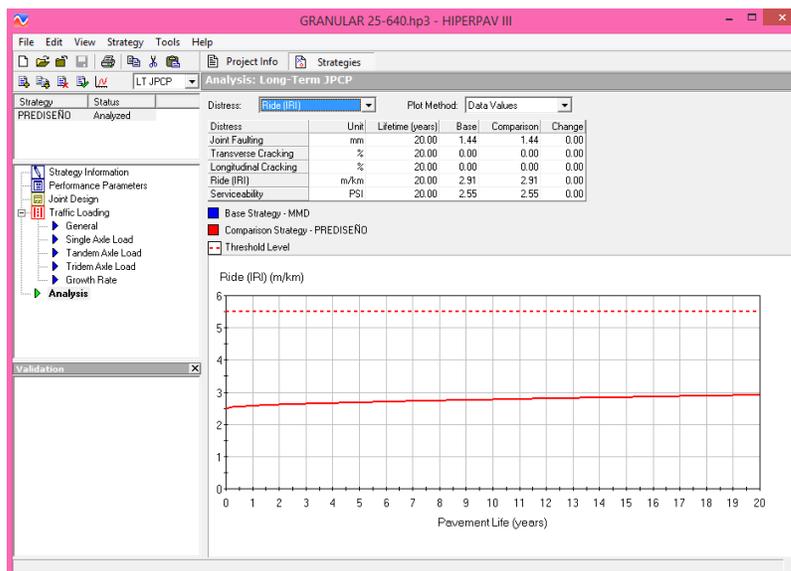


Figura 79 Analisis de deterioros IRI

En este caso el análisis estructural como el de desempeño cumplen con los parámetros de aceptación por lo que este diseño es aceptable y según la última parte del diseño con esto terminaría la iteración y el diseño.

4.3.3 DISEÑO 3

El diseño 3 da un resultado de 25 cm de espesor de losa y 20 cm de espesor de subbase estabilizada con materiales cementantes, con un módulo de ruptura de 45 kg/cm². Con estos valores se realiza el análisis de comportamiento estructural de pavimento como se muestra a continuación:

DISEÑO 3 (Iteración 1)

DATOS GENERALES DE ENTRADA PARA DISEÑO 3	
PARAMETRO	DATO
LOSA	
Longitud	4.00 m
Ancho	3.5 m
Espesor	25 cm
Módulo de Ruptura (MR)	4.2 MPa
Módulo de Elasticidad (E)	28321.67 MPa
Coefficiente de Poisson (nu)	0.20
Coefficiente de expansión térmica	1.1 e ⁻⁵
SUB BASE	
Tipo de sub base	Suelo - Mat Cementantes
Módulo de elasticidad de sub base	5244.76 MPa
Coefficiente de Poisson base	0.15
SUB RASANTE	
k	0.27 MPa/mm
Dovelas	
E dovelas	200000 MPa
nu Dovelas	0.30
Configuración de Losas	Para probar con confinamiento se consideró un tablero de 6 losas dos columnas y tres filas
<p>NOTA: los datos utilizados para ingreso de cargas y pasadores de carga ver tablas de datos en diseño 1 valores constantes que no cambian para este diseño.</p>	

Tabla 31 Entrada general de parametros de diseño para análisis estructural

ESFUERZO MAXIMOS DISEÑO 3

Esfuerzos evaluados para espesor de losa de 25 cm, subbase suelo cemento

de 20 cm, $M_r = 4.2$ MPa

EJE SIMPLE			
ESFUERZOS PRINCIPALES ABSOLUTOS(MPa)			
	BORDE	ESQUINA	CENTRO
Fondo (Tensión)	0.39	0.26	0.37
Superficie (Compresión)	-0.48	-0.27	-0.45

EJE DUAL			
ESFUERZOS PRINCIPALES ABSOLUTOS(MPa)			
	BORDE	ESQUINA	CENTRO
Fondo (Tensión)	0.66	0.66	0.56
Superficie (Compresión)	-0.71	0.7	-0.66

EJE TANDEM			
ESFUERZOS PRINCIPALES ABSOLUTOS(MPa)			
	BORDE	ESQUINA	CENTRO
Fondo (Tensión)	0.48	0.41	0.37
Superficie (Compresión)	-0.53	-0.41	-0.45

EJE TRIDEM			
ESFUERZOS PRINCIPALES ABSOLUTOS(MPa)			
	BORDE	ESQUINA	CENTRO
Fondo (Tensión)	0.35	0.21	0.35
Superficie (Compresión)	-0.38	-0.36	-0.43

Tabla 32 Esfuerzos evaluados en el diseño 3

ANÁLISIS DE DETERIOROS (Diseño 3)

Este diseño comprende un pavimento hidráulico con subbase estabilizada con materiales cementantes y una resistencia a flexión de 600 psi o 42 Kg/cm², los demás datos se detallan a continuación en la siguiente tabla:

DATOS GENERALES DE ENTRADA PARA EL DISEÑO 3	
Parametro	Dato.
Analisis a Edad Temprana	
Confiabilidad	90%
Espesos de Losa	25 pulgadas
Espesor de base	8 pulgadas
Ancho	3.5 mts
Espacio entre juntas transverrsales	4.0 mts
Tipo de cemento	Tipo III
Tipo de agregado	Basalto
Cantidad de cenizavolante	< que el 7%
Tipo de esfuerzo	Esfuerzo al 3/2
Modulo de ruptura	600 PCI
Temperatura inicial	29°
Temperatura inicial entre capa superior e infe.	31°
Metodo de curado	Rociado de curador liquido

Edad de aplicación de curado	1 hora
Esfuerzo de apertura al trafico	420 PSI
Tipo de esfuerzo	Flexion al tercio medio
Temperatura	Estas temperatruas son las registradas ambiente promedio durante 3 dias.
Analisis a un determinado tiempo	
Periodo de diseño	20 años
IRI Inicial	2.5
Escalonamiento	3 mm
Fisuras transversales	5%
Fisuras longitudinales	5%
Maximo IRI permisible	5.5
Serviacibilidad	2.5
Esal's de Diseño	1,027,456

Tabla 33 Datos para el análisis de deterioros

Con los datos de entrada del diseño se pasa a analizar el comportamiento que tendra la losa en un periodo de 20 años y los resultados se presentan a continuacion en las siguientes graficas.

Análisis de escalonamiento de juntas

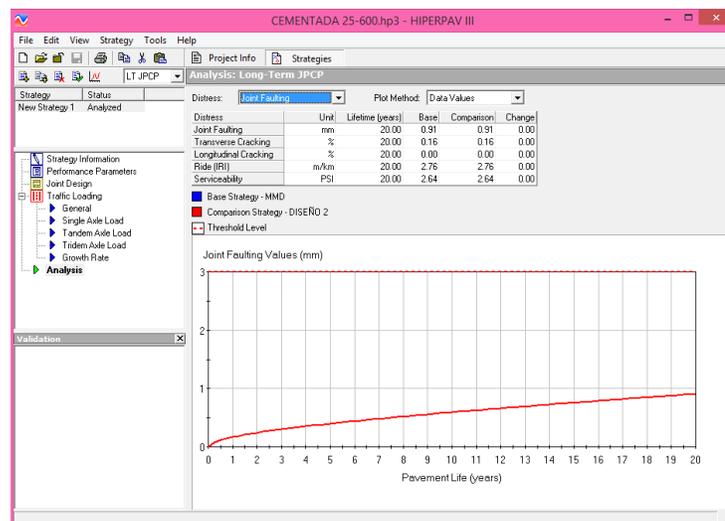


Figura 80 Analisis de deterioros: Escalonamiento

Análisis de agrietamiento transversal

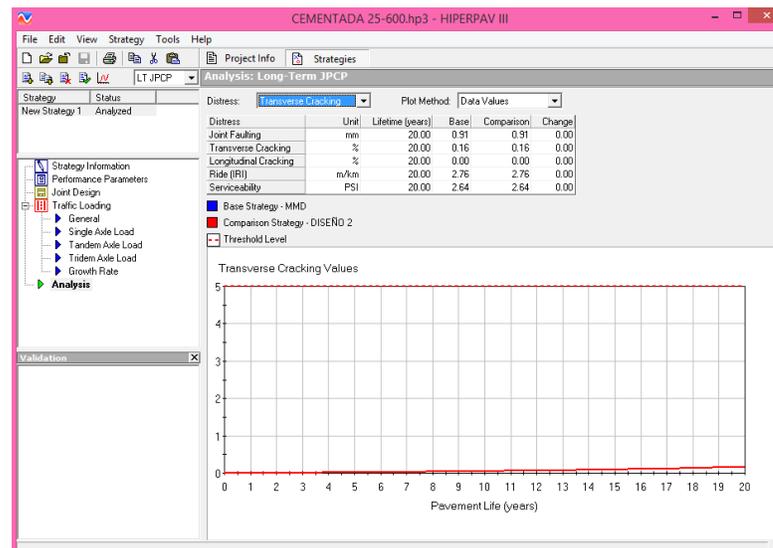


Figura 81 Análisis de deterioros: Agrietamiento transversal

Análisis de agrietamiento longitudinal,

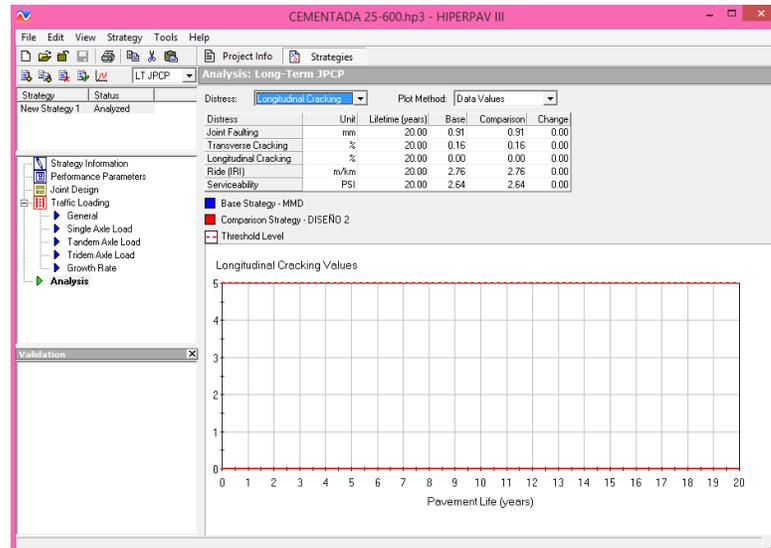


Figura 82 Análisis de deterioro: Agrietamiento longitudinal

Análisis del IRI

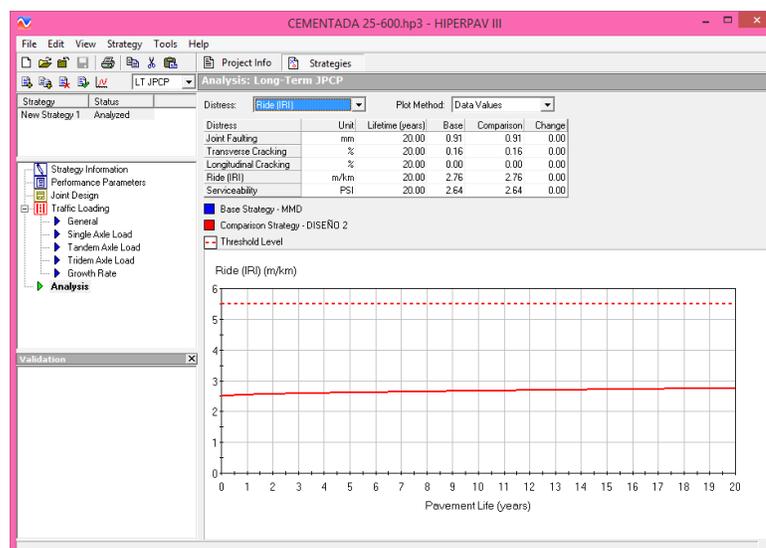


Figura 83 Analisis de deterioro: IRI

4.4 ANÁLISIS COMPARATIVO DE DISEÑOS

Resultados Pre diseño AASHTO 93

Diseño	Espesor de losa(cm)	Espesor de base(cm)	Tipo de base	K (PSI)	MR(MPa)	E(PSI)
1	30	20	Granular	457.2	4.2	4050000
2	25	20	Granular	457.2	4.5	4320000
3	25	20	Estabilizada con materiales cementantes	995	4.2	4050000

Tabla 34 Resultados Pre-Diseño AASHTO 93

Resultado análisis estructural

Diseño	Espesor de losa (cm)	Espesor de base (cm)	Tipo de base	MR (Mpa)	Condición crítica	Esfuerzos Máximos							
						Eje Simple		Eje Dual		Eje tándem		Eje tridem	
						fondo	Superficie	fondo	Superficie	fondo	Superficie	fondo	Superficie
1	30	20	Granular	4.2	Borde	0.31	-0.36	0.56	-0.60	0.39	-0.42	0.42	-0.43
					Centro	0.25	-0.26	0.59	-0.67	0.36	-0.38	0.51	-0.55
					Esquina	0.25	-0.24	0.45	-0.43	0.38	-0.48	0.40	-0.45
2	25	20	Granular	4.5	Borde	0.42	-0.50	0.82	-0.89	0.52	-0.55	0.53	-0.53
					Centro	0.39	-0.45	0.77	-0.85	0.59	-0.63	0.60	-0.64
					Esquina	0.41	-0.50	0.70	-0.52	0.47	-0.53	0.52	-0.58
3	25	20	Estabilizada con Material Cementante	4.2	Borde	0.39	-0.48	0.66	-0.71	0.48	-0.53	0.35	-0.48
					Centro	0.37	-0.45	0.56	-0.66	0.37	-0.45	0.35	-0.45
					Esquina	0.26	-0.27	0.66	-0.70	0.41	-0.41	0.21	-0.27

Tabla 35 Análisis Estructural. Nota: (+) para Tensiones, (-) para Compresiones.

Resultado del análisis de desempeño.

Diseño	Espesor de losa (cm)	Espesor de base (cm)	Tipo de Base	MR (MPa)	Escalonamiento (< 3mm)	Grietas transversales (< 5%)	Grietas longitudinales (< 5%)	IRI (2.5≥IRI≤5.5)
1	30	20	Granular	4.2	0	0	0	2.5
2	25	20	Granular	4.5	0.8	0.3	0	2.4 - 4.5
3	25	20	Estabilizada con Material Cementante	4.2	0.9	0.1	0	2.5-2.9
	30	20			0	0	0	2.5

Tabla 36 análisis de desempeño

4.5 RESULTADO DEL ANÁLISIS COMPARATIVO.

Diseño	Espesor de Losa(cm)	Espesor de Base (cm)	Tipo de Base	MR (MPa)	Análisis estructural	Análisis de desempeño
1	30	20	Granular	4.2	Al realizar el análisis estructural para el caso del diseño 1, podemos observar que estructuralmente el espesor de losa propuesto por el pre diseño en AASHTO 93 cumple con el parámetro de aceptación (esfuerzos menores al 50% del MR) por lo que se procedió a continuar con el diseño propuesto por la alternativa mecanicista empírica y pasar al análisis por desempeño.	Análisis por desempeño satisfactorio los valores de escalonamiento, Grietas tanto longitudinal como transversal e IRI cumple con los parámetros de aceptación de diseño por lo que se procede a la siguiente parte del diseño que es la aceptación del mismo.
2	25	20	Granular	4.5	Análisis estructural satisfactorio esfuerzos menores al 50% del MR	Análisis por desempeño satisfactorio, escalonamiento, grietas longitudinales, grietas transversales, IRI cumplen con los parámetros de

						aceptación por lo que se acepta el diseño propuesto.
3	25	20	Estabilizada con materiales Cementante	4.2	Diseño satisfactorio, en este caso el análisis estructural cumple con el parámetro de aceptación, en este punto se consideró que la base y la losa no están ligadas ya que al considera una condición opuesta los esfuerzos se modifican de forma errónea.	Análisis de desempeño satisfactorio los parámetros de aceptación cumplen con los parámetros límites propuestos y al cumplir también con el análisis estructural el diseño es aceptado

Tabla 37 Análisis Comparativo

CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 CONCLUSIONES

El método AASHTO 93 involucra en la fórmula de diseño básicamente tres categorías de información: Propiedades mecánicas de los materiales, suelo de soporte de las capas del pavimento rígido y cargas de tráfico. En virtud de eso, los espesores obtenidos a través de este método son indicativos de los espesores adecuados para losa y subbase, pudiéndose efectuar variaciones de éstos en función de aspectos diversos, sean estos constructivos, financieros, etc.

En relación a eso, se tiene lo siguiente:

- La alternativa de diseño propuesta, proporciona un análisis estructural y un análisis de desempeño, lo cual hace más confiable la configuración de espesores propuestos, debido a la incorporación de variables importantes como las cargas del tráfico y las cargas del clima propias para las condiciones de El Salvador, con lo cual observamos la importancia de la utilización de estas variables en el diseño de un pavimento, corroborando así la calidad y funcionalidad del pavimento a lo largo de su vida útil.
- Al realizar la investigación pudimos darnos cuenta que no se podría utilizar con exactitud el método que propone la MPEDG (Guía de diseño de pavimentos mecánico empírico), lo que sí es posible, es la utilización

de la alternativa de diseño mecánico empírico como la que se muestra en este documento.

- Las solicitaciones de carga para los ejes de rueda a los que ha sido sometido el pavimento corresponden a valores propios por haber usado los espectros de carga y las temperaturas registradas en el país.
- Al analizar los resultados del análisis estructural para los tres diseños podemos observar que los esfuerzos máximos se dieron en la estructura de pavimento en la cual el módulo de ruptura era más alto, y por consiguiente su módulo de elasticidad aumentaba también, bajo esta condición el alabeo de la losa se ve aumentado también y por consiguiente los esfuerzos a los que se somete el pavimento aumenta lo que lo vuelve más crítico al igual que el análisis de desempeño se vio aumentado por lo que es mejor minimizar el módulo de elasticidad para mejorar las condiciones estructurales del pavimento.

5.2 RECOMENDACIONES

- Que a los futuros diseños de pavimentos rígidos empleados en El Salvador, se les someta a una evaluación de predicción de deterioro y comportamiento a través de la vida de diseño. Esto a fin de garantizar, como primeros intentos, la implementación de enfoques mecánico empíricos como se está realizando en otros países de la región.
- La optimización de los espesores de losa puede llevarse a cabo utilizando esta alternativa propuesta pero se recomienda que esta investigación sea retomada y pueda llevarse a cabo pruebas para poder determinar de una mejor manera los espesores de losa, y así aprovechar los recursos del país.
- Se recomienda ampliar un estudio sobre las propiedades mecánicas de las subbase estabilizadas con suelo cemento para la estructura de pavimentos de concreto hidráulico, ya que según los resultados se pudo comprobar que a mayor rigidez en la subbase, disminuye la capacidad para absorber los esfuerzos que puede llegar a tener la losa de concreto hidráulico.

- Como se observó el módulo de elasticidad es importante en el análisis estructural del pavimento por lo que se recomienda obtener este valor por medio de pruebas de laboratorio, con lo cual se pretendería tener un dato más confiable y seguro en el diseño.
- Al utilizar el programa Ever Fe para el cálculo de los esfuerzos se recomienda para evaluaciones de bases estabilizadas con materiales cementantes, realizar dicho análisis de manera no ligada ya que debido al aporte estructural que genera la capa cementada altera significativamente los esfuerzos obtenidos, lo cual genera esfuerzos mayores a los que realmente se generan bajo esta condición.

BIBLIOGRAFIA

- **AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORT OFFICIALS (AASHTO)**, 1993. Guía para el diseño de estructuras de pavimento.

- **MANUAL CENTROAMERICANO PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS**
Secretaría de Integración Económica Centroamericana (SIECA)
Noviembre, 2002.

- **CALIBRACIÓN A CONDICIONES LOCALES EN ARGENTINA DE LA GUÍA EMPÍRICO MECANICISTA PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS**
MSc. Ing. Oscar Víctor Cordo, Dr. Ing. Marcelo Gastón Bustos, MSc. Ing. Pablo Girardi Mancini, Ing. Miguel Oscar Pereyra.
Escuela de Ingeniería de Caminos de Montaña. Facultad de Ingeniería,
Universidad Nacional de San Juan.

- **ANÁLISIS COMPARATIVO PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES MEDIANTE LAS ALTERNATIVAS: IMT-PAVE Y CR-ME DEL METODO MECANICISTA EMPIRICO, CON EL METODO AASHTO 93**

Ing Angel Baltazar García Vargas, Ing Felipe Alberto Gutiérrez Romero,
Ing Josué David Hernández Soriano.

Escuela de ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería y Arquitectura,
Universidad de El Salvador.

- **MÉTODO DE DISEÑO DE LOSAS DE DIMENSIONES SUPERFICIALES OPTIMIZADAS, EN PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO.**

Ing Pablo Emilio Sánchez Campos

Escuela de ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería y Arquitectura,
Universidad de El Salvador.

- Estudio de Diseño Final para el mejoramiento de la red vial de la zona norte de El Salvador. Diseño Final de Pavimento de la Vialidad Principal VP 07 (Nuevo Trazado SAM21 km 8.2 - Km. 24.2 (Tahuilapa – Matazano)),
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTE, VIVIENDA Y DESARROLLO URBANO. VICEMINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS.
2008

ANEXOS

ANEXO A: ITERACIONES REALIZADAS PARA EVALUACION DE ESFUERZOS EN EVERFE2.24

DISEÑO 1 ITERACION 1

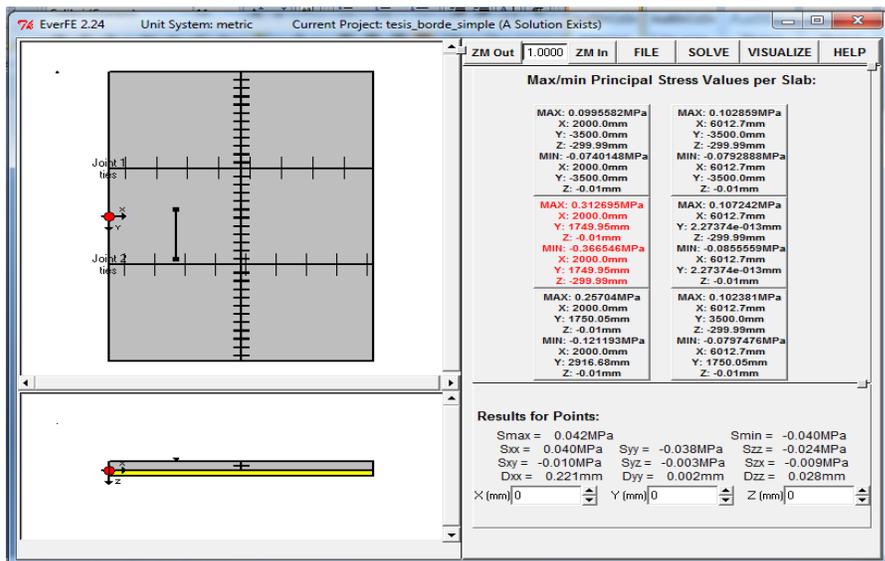


FIGURA A-1 CONDICION BORDE SIMPLE

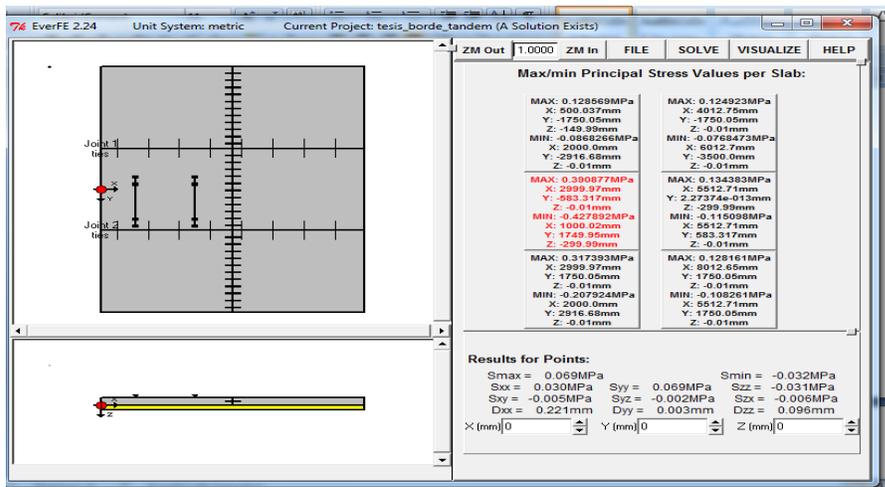


FIGURA A-2 CONDICION BORDE DUAL

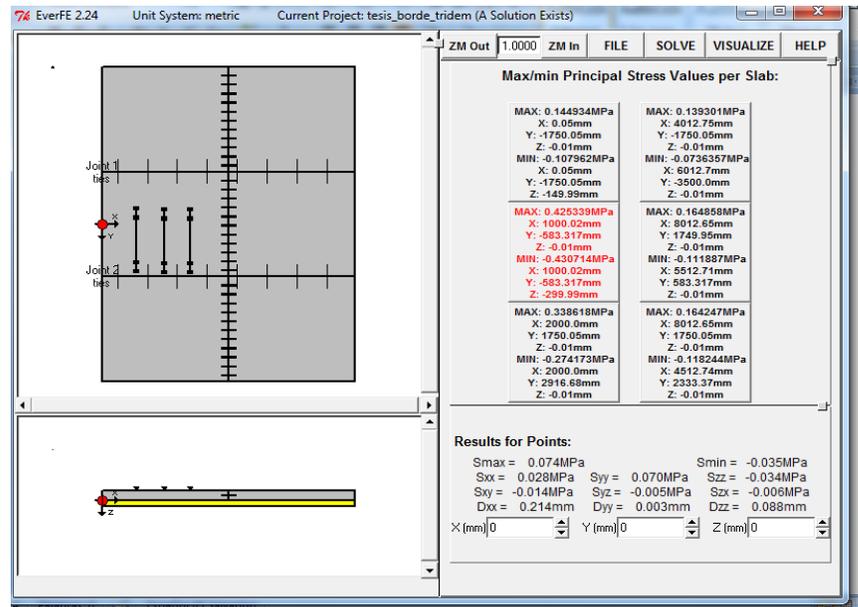


FIGURA A-3 CONDICION BORDE TRIDEM

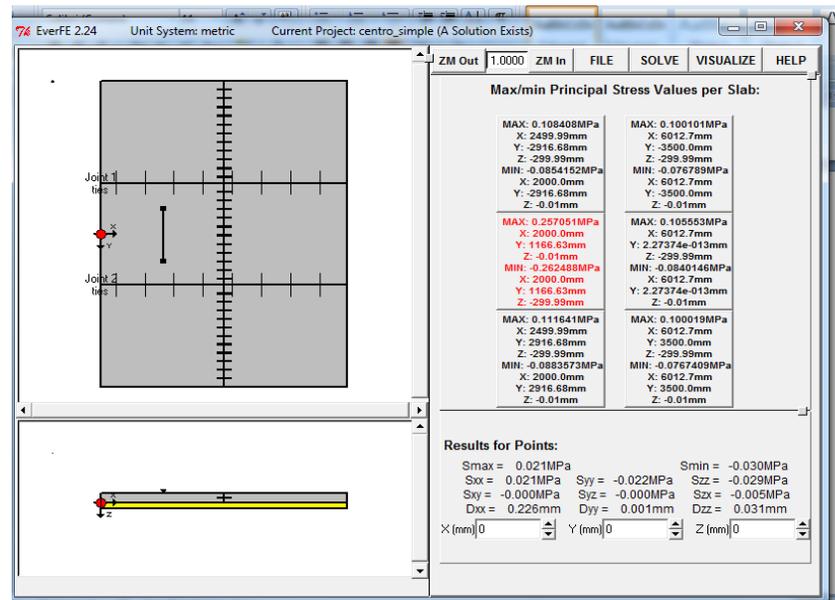


FIGURA A-4 CONDICION CENTRO SIMPLE

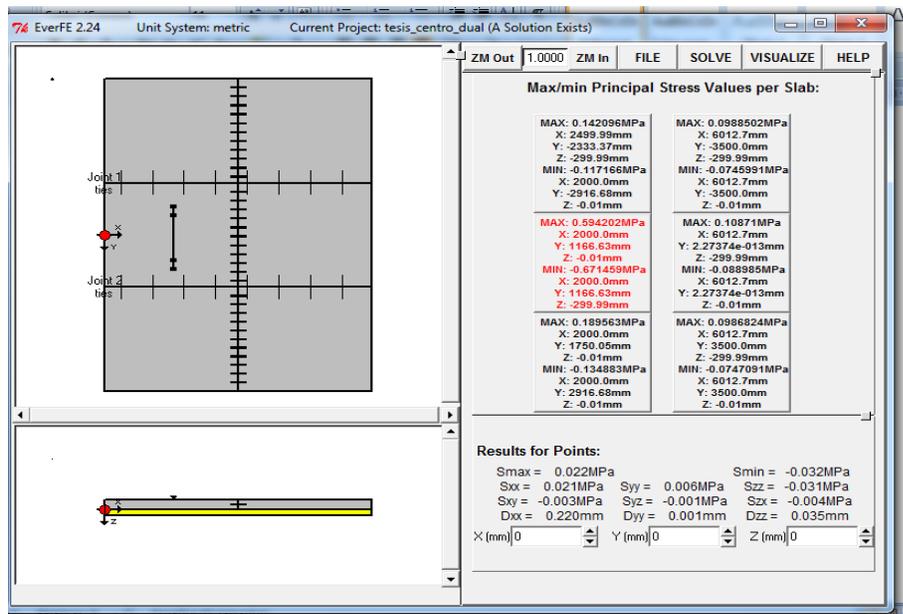


FIGURA A-5 CONDICION CENTRO DUAL

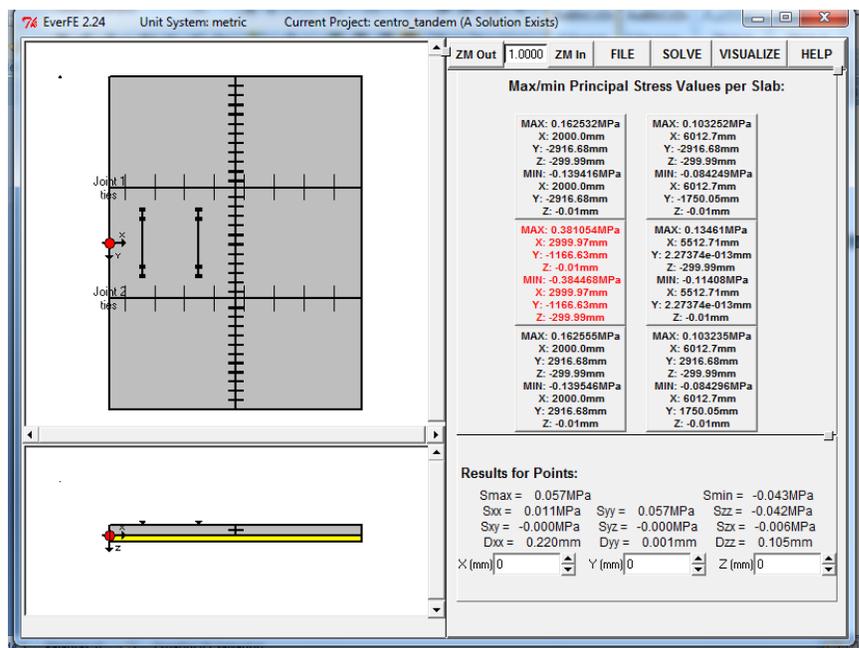


FIGURA A-6 CONDICION CENTRO TANDEM

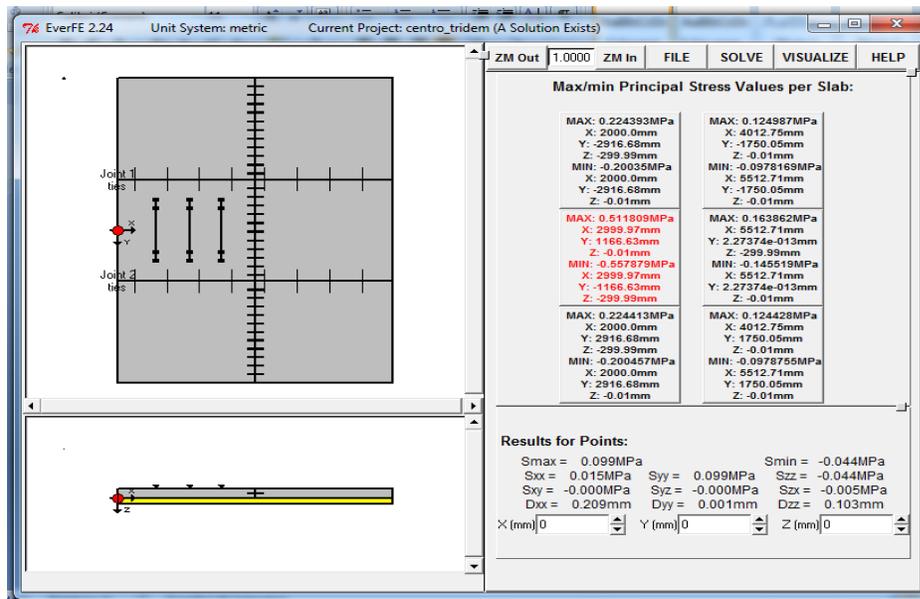


FIGURA A-7CONDICION CENTRO TRIDEM

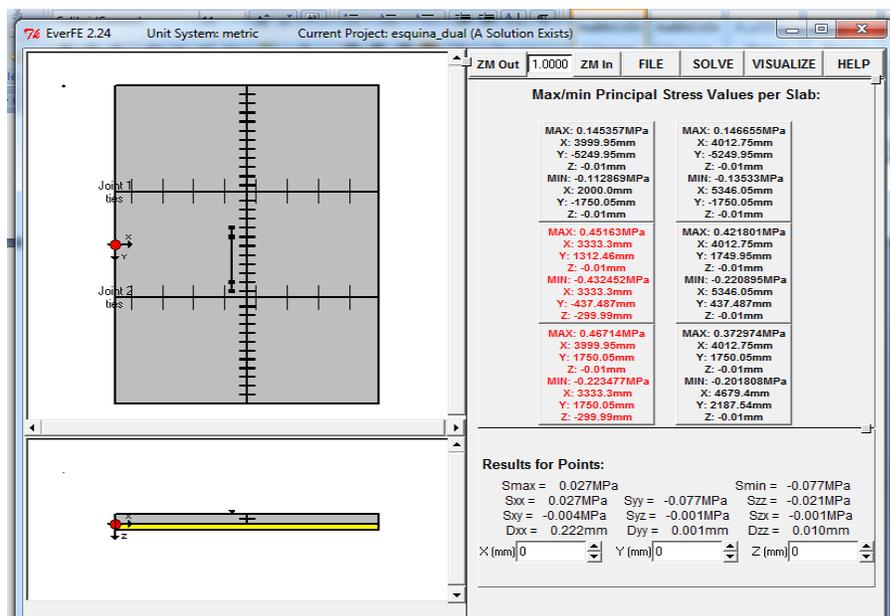


FIGURA A-8 CONDICION ESQUINA DUAL

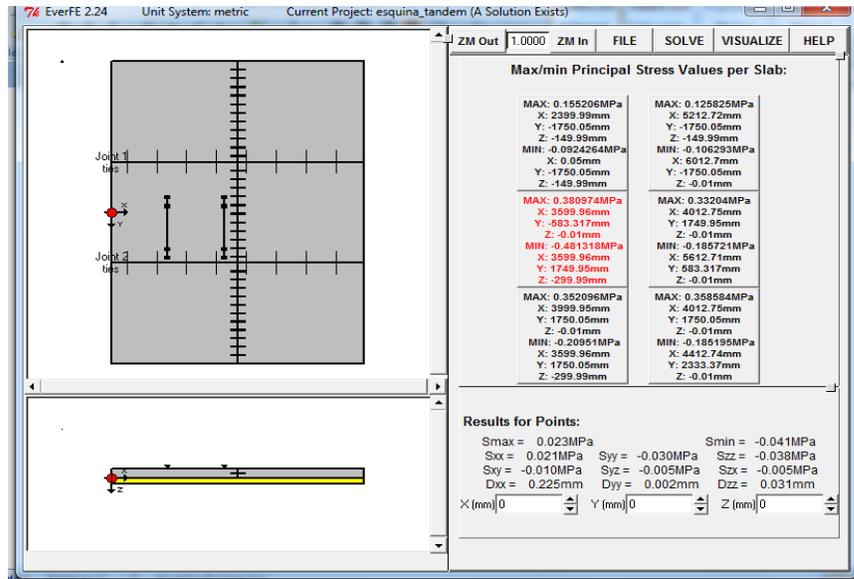


FIGURA A-9 CONDICION ESQUINA TANDEM

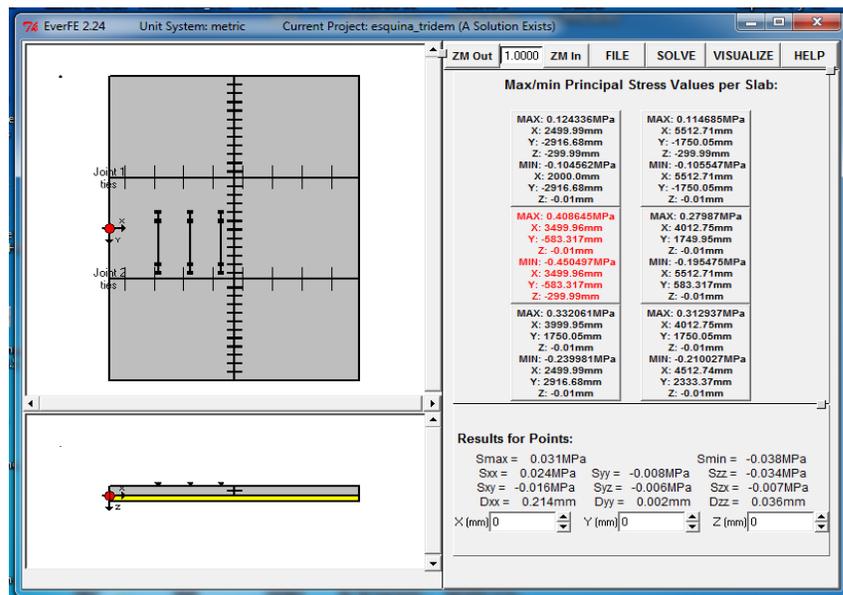


FIGURA A-10 CONDICION ESQUINA TRIDEM

DISEÑO 2 ITERACION

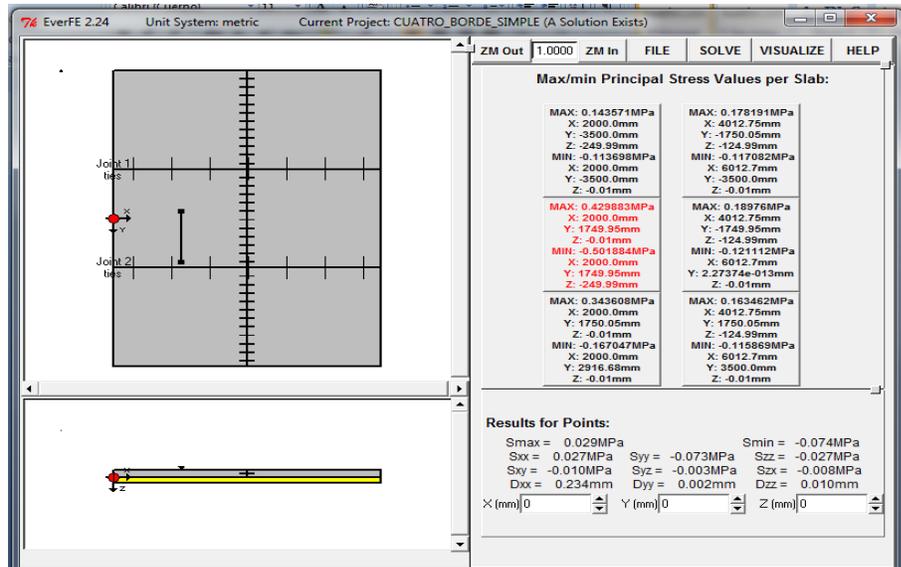


FIGURA A-11 CONDICION BORDE SIMPLE

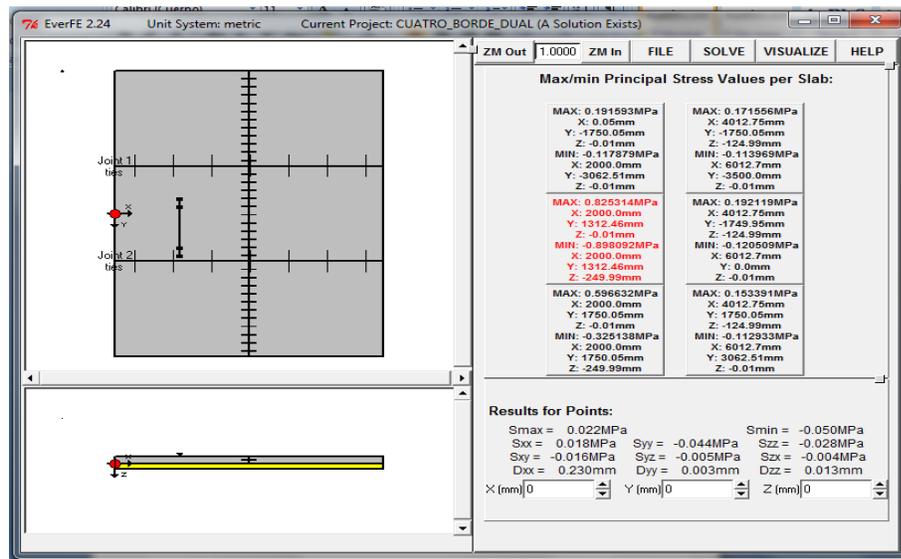


FIGURA A-12 CONDICION BORDE DUAL

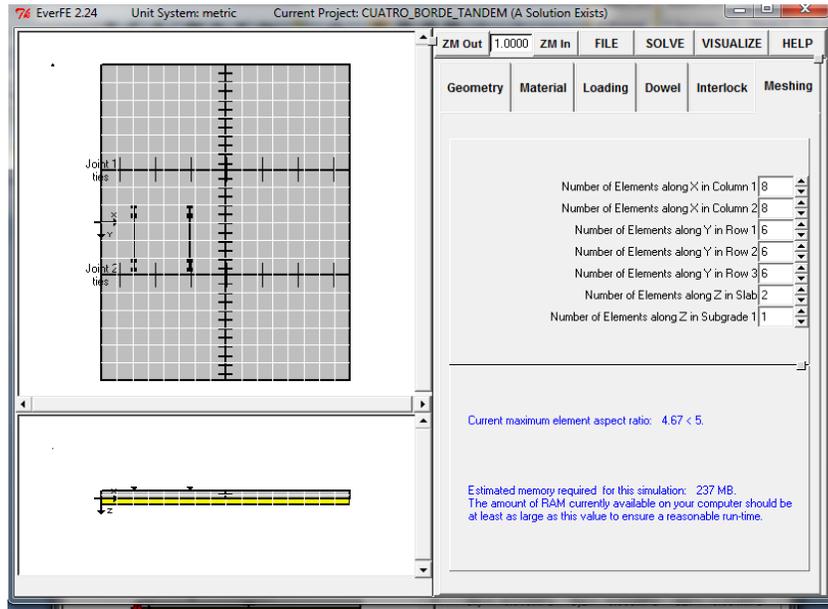


FIGURA A-13 CONDICION BORDE TANDEM

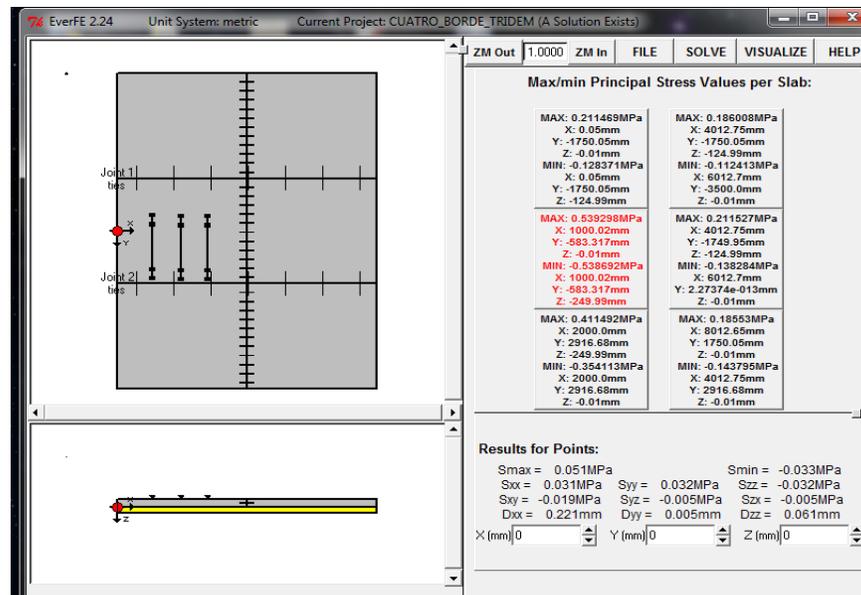


FIGURA A-14 CONDICION BORDE TRIDEM

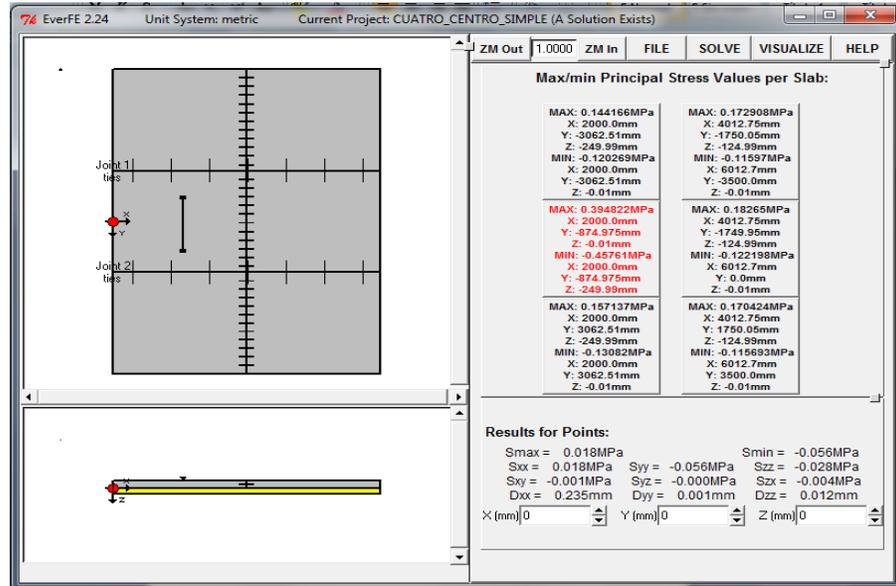


FIGURA A-15 CONDICION CENTRO SIMPLE

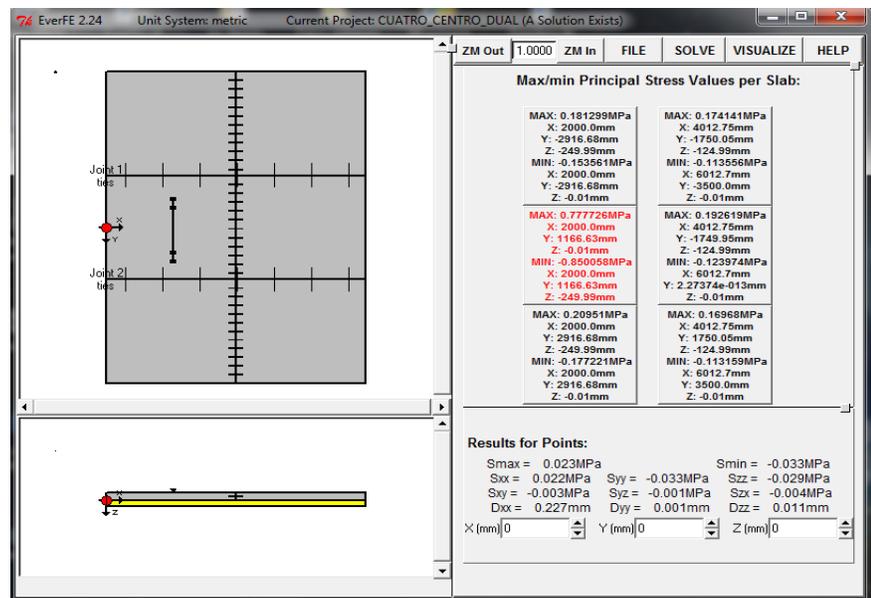


FIGURA A-16 CONDICION CENTRO DUAL

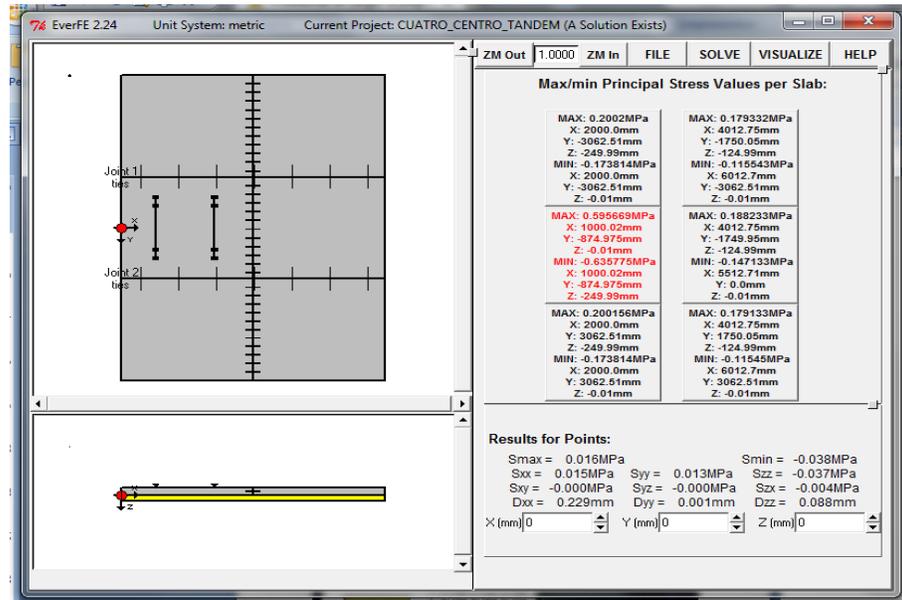


FIGURA A-17 CONDICION CENTRO TANDEM

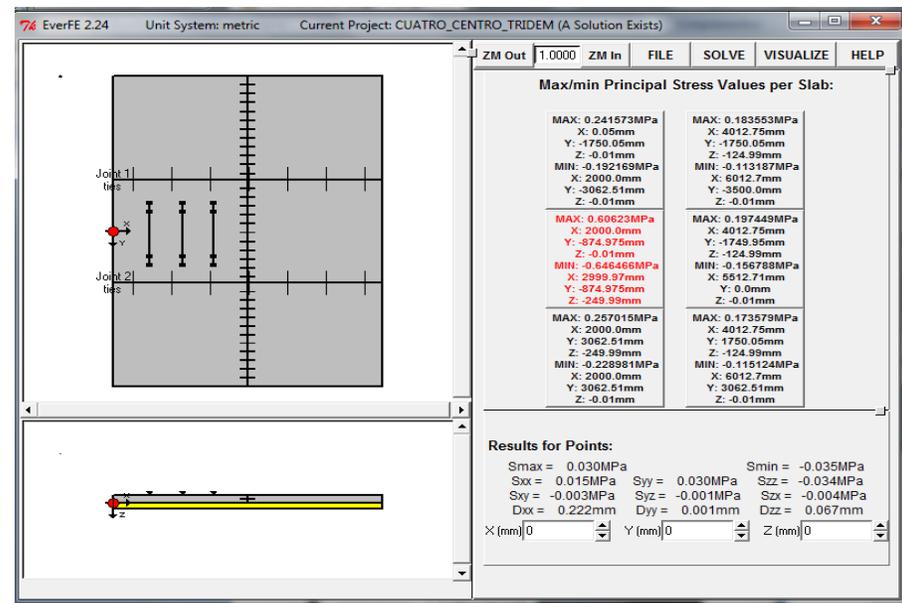


FIGURA A-18 CONDICION CENTRO TRIDEM

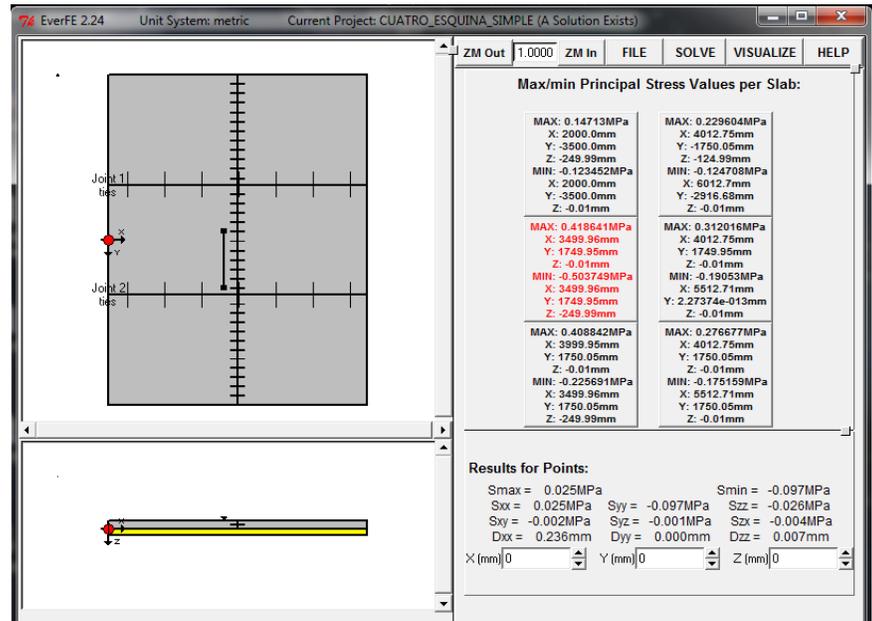


FIGURA A-19 CONDICION ESQUINA SIMPLE

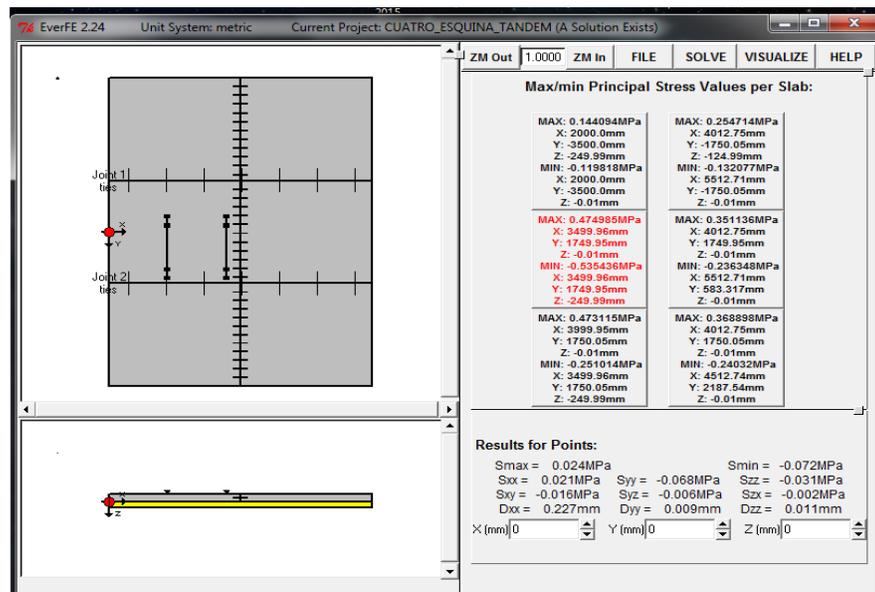


FIGURA A-20 CONDICION ESQUINA TANDEM

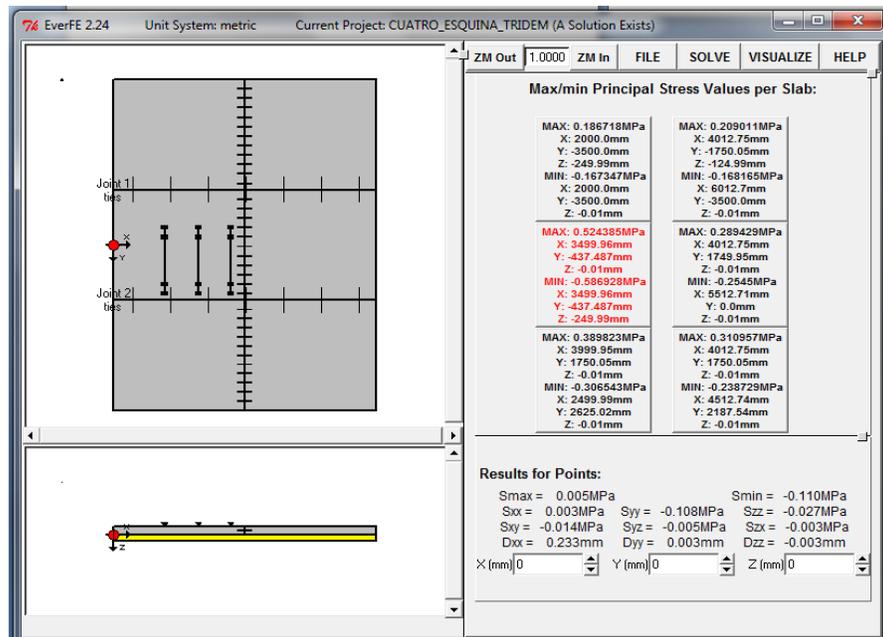


FIGURA A-21 CONDICION ESQUINA TRIDEM

DISEÑO 3 ITERACION 1

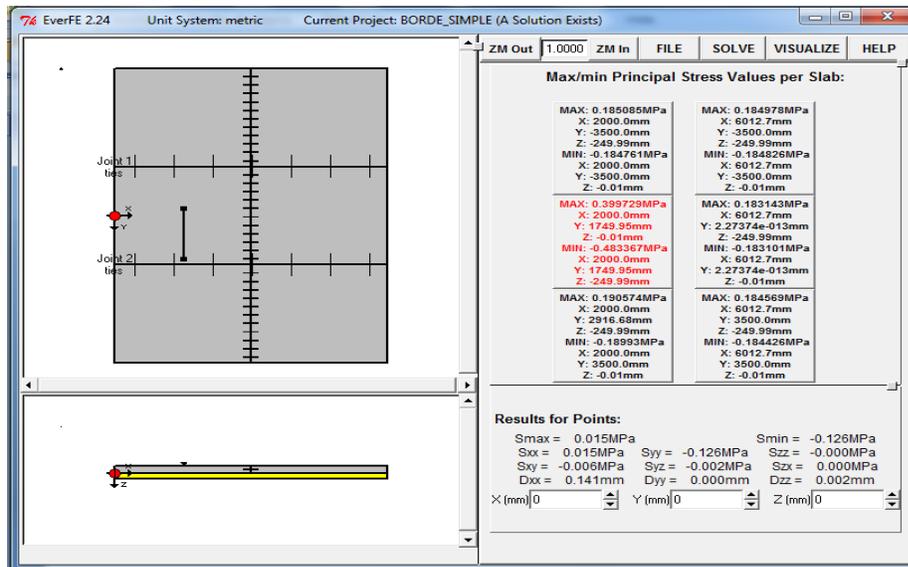


FIGURA A -22 CONDICION BORDE SIMPLE

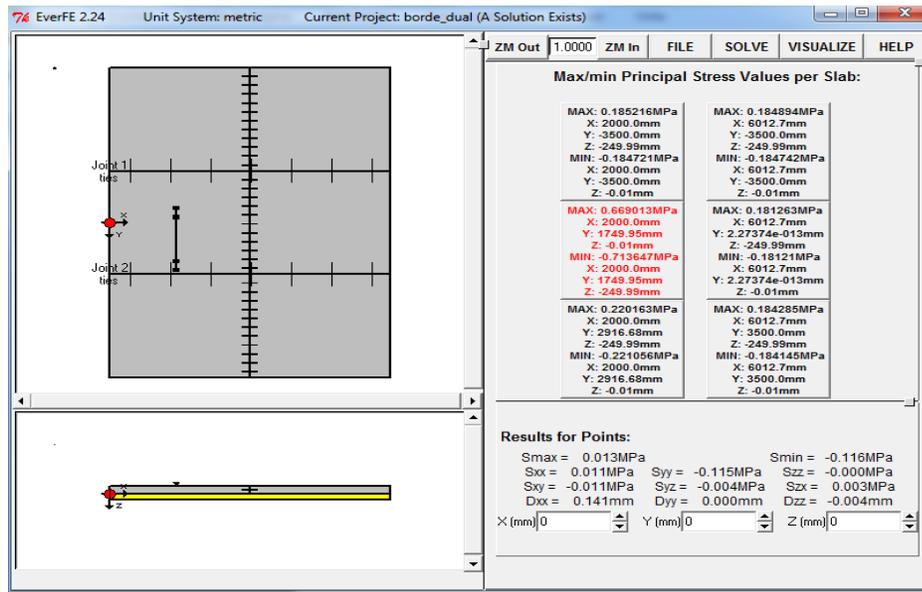


FIGURA A -23 CONDICION BORDE DUAL

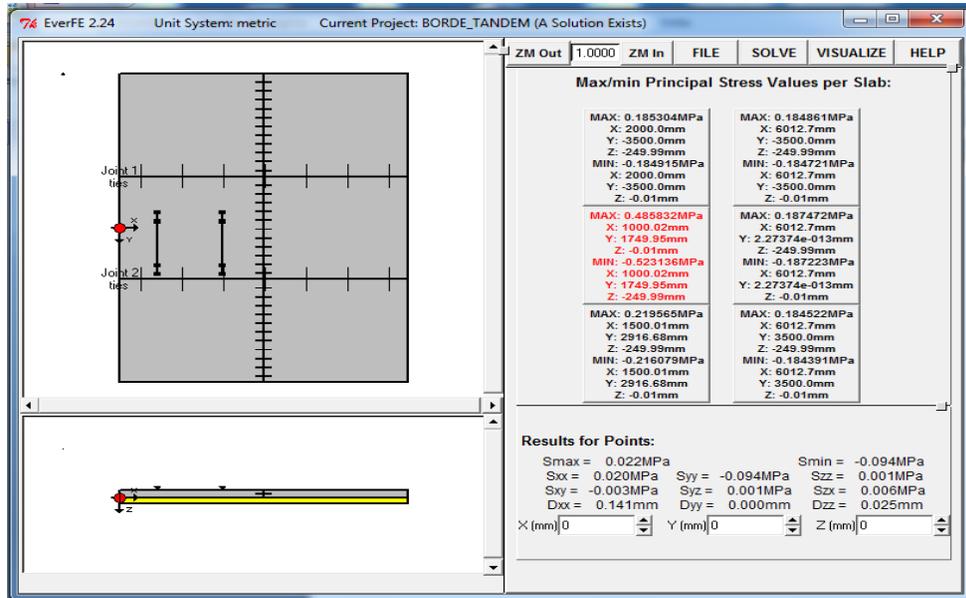


FIGURA A -24 CONDICION BORDE TANDEM

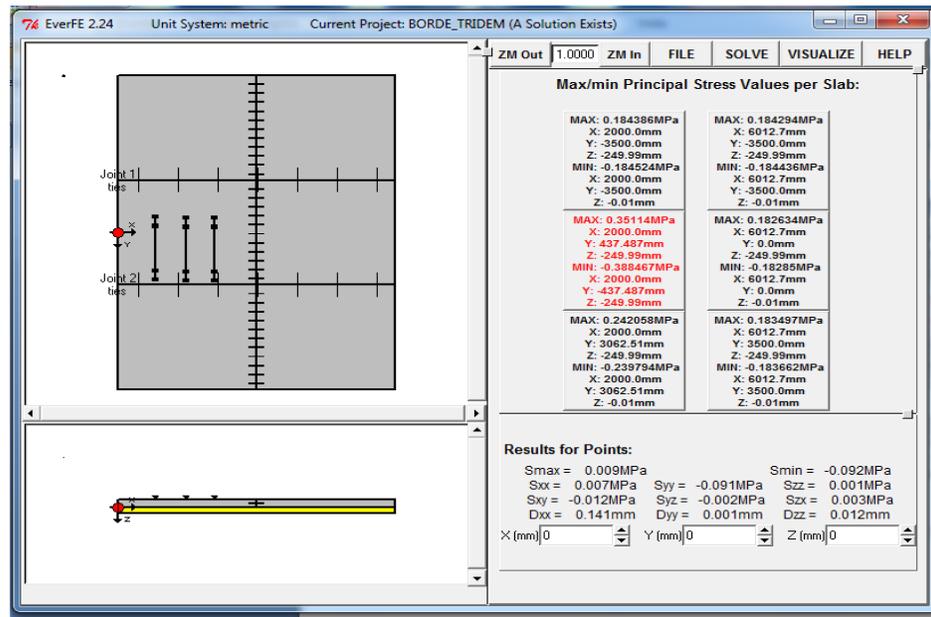


FIGURA A -25 CONDICION BORDE TRIDEM

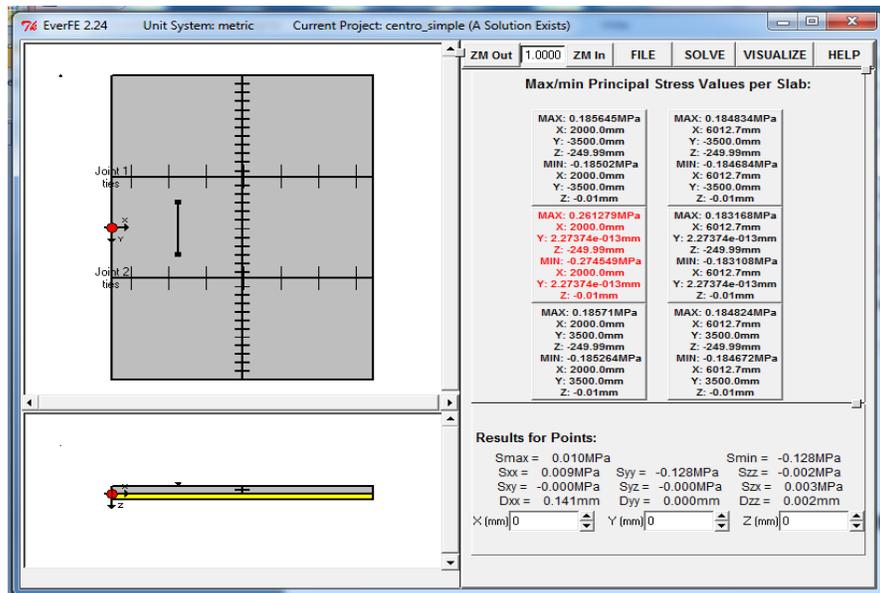


FIGURA A -26 CONDICION CENTRO SIMPLE

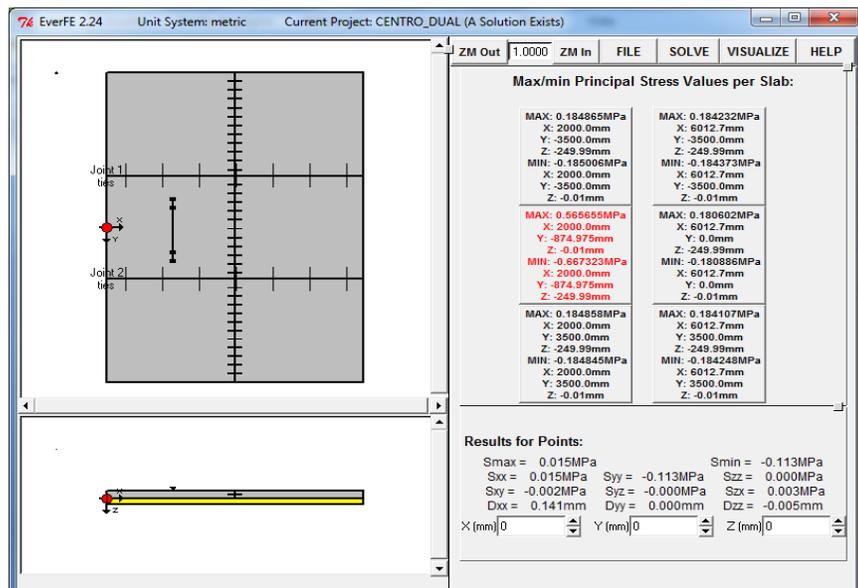


FIGURA A -27 CONDICION CENTRO DUAL

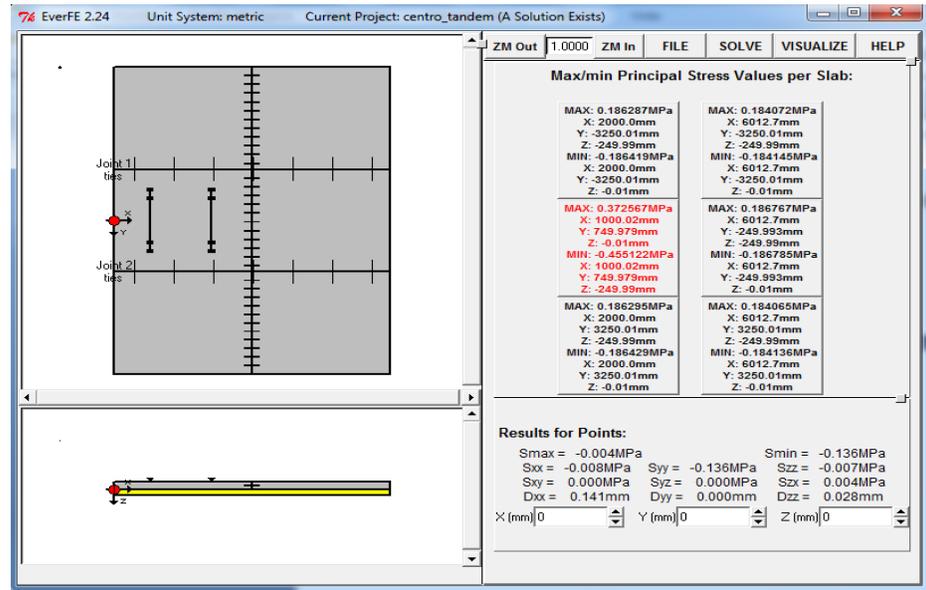


FIGURA A -28 CONDICION CENTRO TANDEM

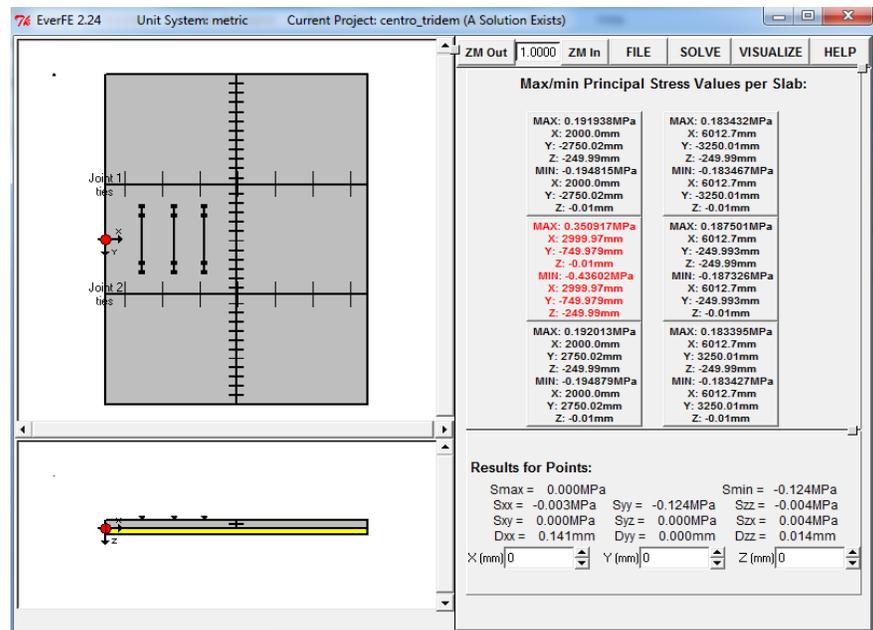


FIGURA A -29 CONDICION CENTRO TRIDEM

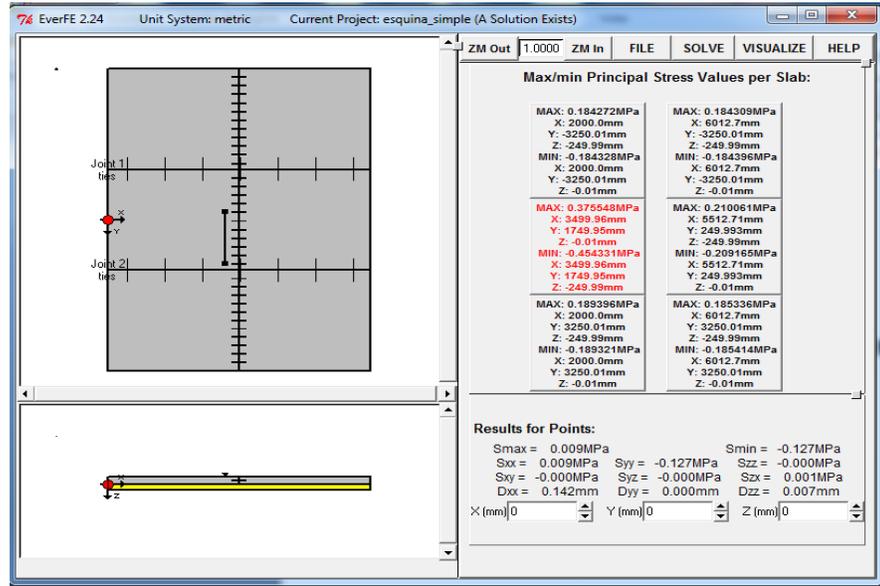


FIGURA A -30 CONDICION ESQUINA SIMPLE

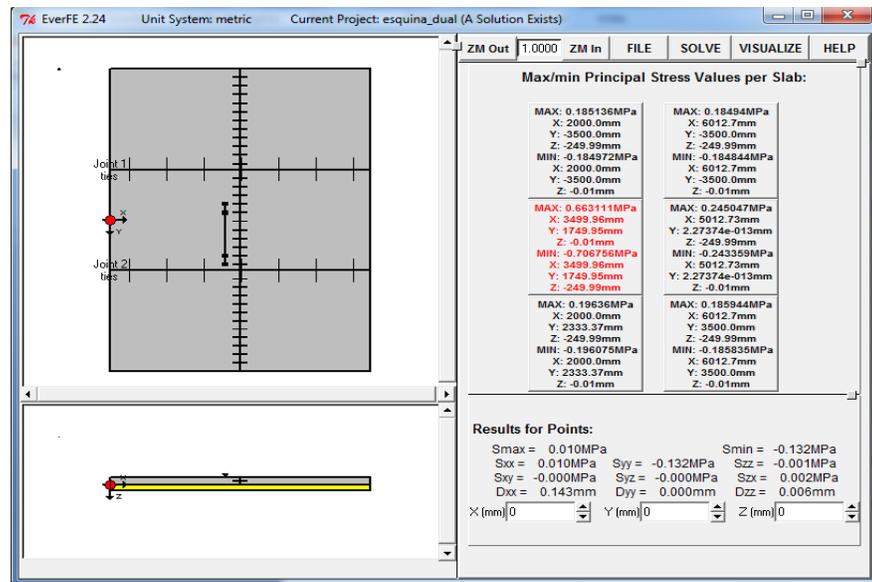


FIGURA A -31 CONDICION ESQUINA DUAL

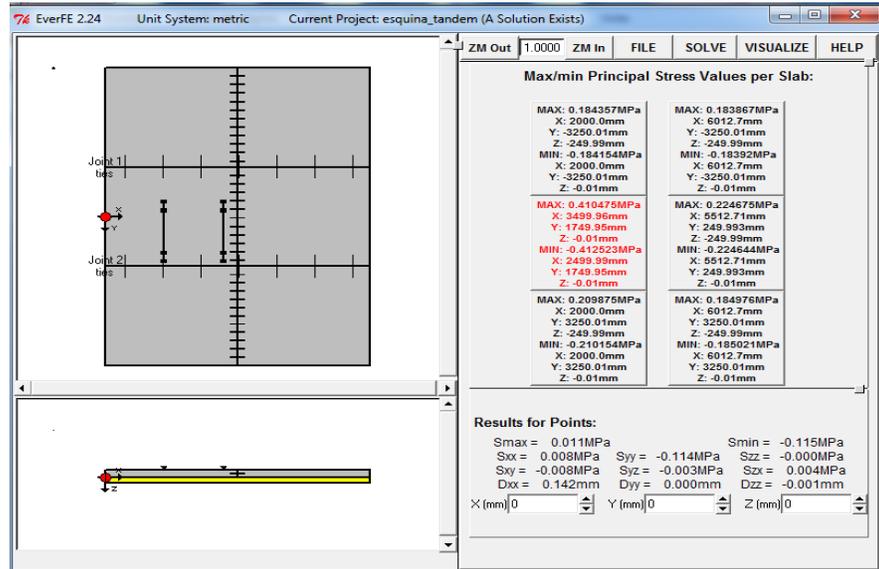


FIGURA A -32 CONDICION ESQUINA TANDEM

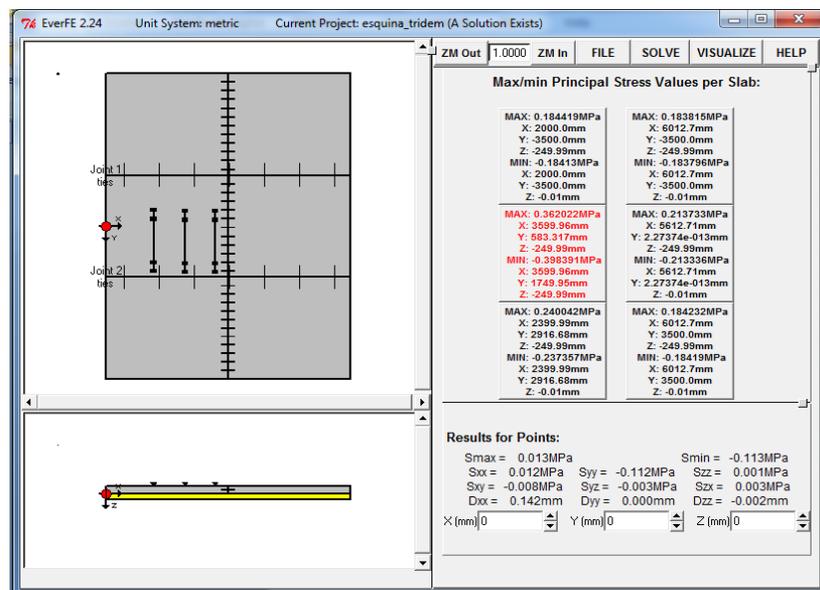


FIGURA A -33 CONDICION ESQUINA TRIDEM