

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

Modelos de Desempeño en Pavimentos Rígidos

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

José Mauricio Miranda Villegas

Director de Proyecto de Graduación:

Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, MSc, PhD

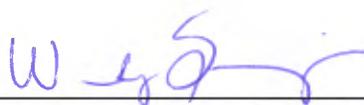
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

HOJA DE APROBACIÓN

Tribunal de graduación:



Director del comité Ing. Luis Guillermo Loria Salazar, MSc, PhD.



Asesora: Ing. Wendy Sequeira Rojas, Msc.



Asesor: Ing. Alejandro Navas Garro, Msc.

Estudiante:



José Mauricio Miranda Villegas

Fecha: 2016, abril, 7

El suscrito, José Mauricio Miranda Villegas, cédula 4-0200-0158, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné **A63634**, manifiesta que es autor del Proyecto Final de Graduación titulado **“Modelos de Desempeño en Pavimentos Rígidos”** bajo la Dirección del **Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, MSc, PhD.**, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

Nota: De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); “no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales”. Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

Agradecimientos

Al Ing. Luis Guillermo Loría S. por permitirme trabajar en el LanammeUCR y elaborar este proyecto.

A Ing. Wendy Sequeira R, Ing. Alejandro Navas G, Ing. Ana Monge S., Ing. Paulina Leiva P., Ing. Einer Rodríguez, Ing. Francisco Villalobos R. y demás miembros del LanammeUCR que de una u otra manera se vieron involucrados en este proyecto, muchas gracias por toda su colaboración y ayuda.

A los representantes de las empresas Amco, Cemex, FCC Construcción, Holcim y Sika por su cooperación y asesoría en el proyecto.

Dedicatoria

A Dios y a la Virgen de los Ángeles, que me permitieron alcanzar este logro y me han llenado de fe y esperanza especialmente en los momentos más difíciles.

A mi madre, la Sra. Ana I. Miranda Villegas a quien le debo todo lo que soy y he logrado, muchas gracias por creer en mí y apoyarme.

A mis familiares, amigos y compañeros que de muchas formas han estado a mi lado en todos estos años. Dios les bendiga.

"Pues estoy seguro de que ni la muerte ni la vida ni los ángeles ni los principados ni lo presente ni lo futuro ni las potestades, ni la altura ni la profundidad ni otra criatura alguna podrá separarnos del amor de Dios manifestado en Cristo Jesús Señor nuestro."

Romanos 8, 38-39.

Índice

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Justificación.....	1
1.1.1 <i>El problema específico</i>	1
1.1.2 <i>Importancia</i>	2
1.1.3 <i>Antecedentes</i>	3
1.2. Objetivos.....	4
1.2.1 <i>Objetivo general</i>	4
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i>	4
1.3. Delimitación del problema.....	5
1.3.1 <i>Alcances</i>	5
1.3.2 <i>Limitaciones</i>	6
1.4. Metodología.....	6
1.4.1 <i>Fase teórica</i>	7
1.4.2 <i>Fase experimental</i>	7
1.4.3 <i>Fase de Análisis</i>	9
1.5. Marco teórico.....	9
1.5.1 <i>Pavimentos rígidos</i>	9
1.5.2 <i>Pavimento Rígido del Proyecto Cañas- Liberia</i>	13
1.5.3 <i>Diseño de pavimentos rígidos</i>	16
1.5.4 <i>Fallas principales en pavimentos rígidos</i>	18
CAPÍTULO II. INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1. Modelos de deterioro.....	19
2.1.1 <i>Repeticiones de Carga</i>	22
2.1.2 <i>Ecuación de fatiga en Costa Rica</i>	22
2.1.3 <i>Modelos de fatiga</i>	22

2.2.	Diseño Mecanístico-Empírico.....	25
2.3.	Generalidades de la guía de diseño MEPDG.....	26
2.3.1.	<i>Insumos del diseño preliminar y condiciones del sitio.....</i>	<i>27</i>
2.3.2.	<i>Modelo de respuesta estructural.....</i>	<i>27</i>
2.3.3.	<i>Confiabilidad del diseño.....</i>	<i>28</i>
2.3.4.	<i>Respuestas Críticas en JPCP.....</i>	<i>29</i>
2.3.5.	<i>Datos de entrada para el software del diseño de pavimentos rígidos.....</i>	<i>32</i>
2.3.6.	<i>Consideraciones en el Diseño de Pavimentos JPCP.....</i>	<i>36</i>
2.3.7.	<i>Criterios de Desempeño JPCP.....</i>	<i>40</i>
2.3.8.	<i>Falla por junta transversal.....</i>	<i>45</i>
2.3.9.	<i>Modelo de respuesta estructural para Escalonamiento.....</i>	<i>45</i>
2.3.10.	<i>Predicción del Desempeño de la Regularidad.....</i>	<i>45</i>
2.3.11.	<i>Situaciones de carga especiales.....</i>	<i>46</i>
2.4.	Calibraciones laboratorio- campo.....	46
2.4.1.	<i>Caso de Chile.....</i>	<i>47</i>
2.4.2.	<i>Estudios de la Universidad de Illinois.....</i>	<i>48</i>
CAPÍTULO III. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES, ENSAYOS ESTÁTICOS, DINÁMICOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		51
3.1.	Mezcla 1.....	51
3.1.1.	<i>Agregados.....</i>	<i>52</i>
3.1.2.	<i>Cemento.....</i>	<i>54</i>
3.1.3.	<i>Diseño de mezcla de concreto.....</i>	<i>54</i>
3.1.4.	<i>Ensayos estáticos.....</i>	<i>55</i>
3.1.5.	<i>Ensayos dinámicos.....</i>	<i>57</i>
3.2.	Mezcla 2.....	63
3.2.1.	<i>Agregados.....</i>	<i>65</i>

3.2.2.	<i>Cemento</i>	67
3.2.3.	<i>Diseño de mezcla de concreto</i>	67
3.2.4.	<i>Ensayos estáticos</i>	68
3.2.5.	<i>Ensayos dinámicos</i>	68
3.3.	Mezcla 3.....	70
3.3.1.	<i>Agregados</i>	72
3.3.2.	<i>Diseño de mezcla de concreto</i>	74
3.3.3.	<i>Ensayos estáticos</i>	75
3.3.4.	<i>Ensayos dinámicos</i>	75
3.4.	Comparación entre mezclas.....	78
3.5.	Ecuación de fatiga genérica.....	79
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS MECANICISTA.....		81
4.1.	Estructura de pavimento rígido.....	81
4.2.	Modelado en el software ISLAB2000.....	83
4.2.1.	Propiedades de los materiales.....	83
4.2.2.	<i>Camión de Diseño</i>	84
4.2.3.	<i>Gradiente térmico</i>	86
4.2.4.	<i>Agrietamiento transversal de abajo hacia arriba</i>	86
4.2.5.	<i>Agrietamiento transversal de arriba hacia abajo</i>	87
4.3.	Resultados de la modelación en ISLAB2000.....	88
4.4.	Análisis con el programa ApRIGID 1.0.....	99
4.5.	Otros modelos de fatiga.....	102
Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones.....		104
5.1.	Conclusiones.....	104
5.2.	Recomendaciones.....	107
VI.	FUENTES DE INFORMACIÓN.....	110

VII. ANEXOS.....	I
Anexo A. Hoja técnica de Agregados y cemento Holcim.....	I
Anexo B. Caracterización de los materiales (mezcla1).....	V
Anexo C. Diseño de mezcla1 (Cemento Holcim MP-AR y agregados Holcim).....	VII
Anexo D Caracterización de los materiales Mezcla II.....	VIII
Anexo E. Hoja técnica del aditivo para redosificación de concreto utilizado en la mezcla 2 X	
Anexo F Caracterización de los materiales Mezcla 3.....	XI
Anexo G. Ficha técnica Aditivo Plastoconcrete 939 CR. Utilizado en la mezcla 3.....	XII
Anexo H Ficha técnica del aditivo Sikament 195 CR utilizado en la mezcla 3.....	XIII

Índice de Figuras

Figura 1. Metodología de trabajo.....	7
Figura 2. Elementos principales de un pavimento rígido.....	10
Figura 3. Pavimento de Concreto Simple Articulado o de Juntas.....	11
Figura 4. Pavimento de Concreto Reforzado Articulado (JRCP).....	12
Figura 5. Pavimento de Concreto Continuamente Reforzado (CRCP).....	13
Figura 6. Modelo de fatiga.....	20
Figura 7. Montaje de ensayo a flexión.....	20
Figura 8. Relación entre el daño por fatiga y el agrietamiento de losa agrietada en JPCP.....	28
Figura 9. Ubicación de la carga y esfuerzo crítico para agrietamiento de abajo hacia arriba..	30
Figura 10. Ubicación de la carga y esfuerzo crítico para agrietamiento de arriba hacia abajo	31
Figura 11. Ubicación de la carga y esfuerzo crítico para falla de juntas.....	32
Figura 12. Perfiles de temperatura típicos en una losa de 10 pulgadas de espesor.....	34
Figura 13. Modelo de agrietamiento JPCP a partir de los datos de campo.....	41
Figura 14. Agregado grueso, mezcla 1.....	51
Figura 15. Agregado fino, mezcla 1.....	52
Figura 16. Curva granulométrica del agregado fino (mezcla 1).....	52
Figura 17. Curva granulométrica del agregado grueso (mezcla 1).....	53
Figura 18. Ensayo materia orgánica en el agregado fino para la mezcla 1.....	54
Figura 19. Ensayo módulo de ruptura.....	56
Figura 20. Ensayo módulo de elasticidad.....	56
Figura 21. Módulo de Elasticidad mezcla 1.....	57
Figura 22. Montaje utilizado en los ensayos dinámicos.....	58
Figura 23. Módulo Dinámico viga V1-1-95.....	61
Figura 24. Reducción del Módulo Dinámico en uno de los ensayos de fatiga.....	62
Figura 25. Relación Número de repeticiones contra razón de esfuerzo para la mezcla 1.....	63
Figura 26. Agregado fino, mezcla 2.....	64
Figura 27. Agregado grueso, mezcla 2.....	64
Figura 28. Curva granulométrica del agregado fino (mezcla 2).....	65
Figura 29. Curva granulométrica del agregado grueso (mezcla 2).....	66
Figura 30. Ensayo materia orgánica en el agregado fino para la mezcla 2.....	67
Figura 31. Relación Número de repeticiones contra razón de esfuerzo para la mezcla 2.....	70
Figura 32. Agregado grueso, mezcla 3.....	71

Figura 33. Agregado fino, mezcla 3.....	72
Figura 34. Curva granulométrica del agregado fino (mezcla 3).....	73
Figura 35. Curva granulométrica del agregado grueso (mezcla 3).....	73
Figura 36. Ensayo materia orgánica en el agregado fino para la mezcla 3.....	74
Figura 37. Relación Número de repeticiones contra razón de esfuerzo para la mezcla 3.....	78
Figura 38. Modelo de fatiga genérico.....	80
Figura 39. Pavimento Rígido Sección: Cañas-Liberia.....	82
Figura 40. Configuración geometría del vehículo T3-S2.....	84
Figura 41. Dimensiones de los ejes simple y dual en el sentido transversal.....	85
Figura 42. Configuración de carga para agrietamiento de abajo hacia arriba.....	87
Figura 43. Configuración de carga para agrietamiento de abajo hacia arriba.....	88
Figura 44. Resultados agrietamiento de abajo hacia arriba de la losa de concreto mezcla 1.	91
Figura 45. Resultados agrietamiento de arriba hacia abajo de la losa de concreto mezcla 1.	92
Figura 46. Resultados agrietamiento de abajo hacia arriba de la losa de concreto mezcla 2.	93
Figura 47. Resultados agrietamiento de arriba hacia abajo de la losa de concreto mezcla 2.	94
Figura 48. Resultados agrietamiento de abajo hacia arriba de la losa de concreto mezcla 3.	95
Figura 49. Resultados agrietamiento de abajo hacia arriba de la losa de concreto mezcla 3.	96
Figura 50. Salida típica del software ApRIGID 1.0.....	100

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Modelos de fatiga.....	24
Cuadro 2. Pesos Unitarios mezcla 1.....	53
Cuadro 3. Diseño de mezcla 1.....	55
Cuadro 4. Ensayos estáticos, mezcla 1.....	55
Cuadro 5. Carga soportada y módulo de ruptura en condición seca, mezcla 1.....	59
Cuadro 6. Módulo Dinámico para la mezcla 1.....	60
Cuadro 7. Resultados de los ensayos de fatiga para la mezcla 1.....	62
Cuadro 8. Pesos Unitarios mezcla 2.....	66
Cuadro 9. Diseño de mezcla 2.....	68
Cuadro 10. Ensayos estáticos, mezcla 2.....	68
Cuadro 11. Carga soportada y módulo de ruptura en condición seca, mezcla 2.....	69
Cuadro 12. Módulo Dinámico para la mezcla 2.....	69
Cuadro 13. Resultados de los ensayos de fatiga para la mezcla 2.....	70
Cuadro 14. Pesos Unitarios mezcla 3.....	74
Cuadro 15. Diseño de mezcla 3.....	75
Cuadro 16. Ensayos estáticos, mezcla 3.....	75
Cuadro 17. Carga soportada y módulo de ruptura en condición seca, mezcla 3.....	76
Cuadro 18. Módulo Dinámico para la mezcla 3.....	76
Cuadro 19. Resultados de los ensayos de fatiga para la mezcla 3.....	77
Cuadro 20. Comparación entre mezclas.....	78
Cuadro 21. Diseño de pavimento de concreto para la mezcla 1 y 2.....	82
Cuadro 22. Modulo elástico para las distintas capaz del pavimento.....	83
Cuadro 23. Eficiencia de transferencia de carga para los tramos analizados por LanammeUCR	86
Cuadro 24. Esfuerzos y deformaciones obtenidos mediante ISLAB2000, mezcla 1.....	89
Cuadro 25. Esfuerzos y deformaciones obtenidos mediante ISLAB2000, mezcla 2.....	89
Cuadro 26. Esfuerzos y deformaciones obtenidos mediante ISLAB2000, mezcla 3.....	90
Cuadro 27. Resultados al aplicar la ecuación de fatiga.....	97
Cuadro 28. Parámetros utilizados en el software ApRIGID 1.0.....	100
Cuadro 29. Deflexión máxima obtenida mediante ApRIGID1.0.....	100
Cuadro 30. Esfuerzo máximo obtenido en la superficie de la losa.....	101

Cuadro 31. Esfuerzo máximo en la parte inferior de la losa.....	101
Cuadro 32. Número de repeticiones admisibles según los modelos de fatiga.....	103
Cuadro 33. Granulometría del agregado fino para la mezcla 1.....	V
Cuadro 34. Granulometría del agregado grueso para la mezcla 1.....	V
Cuadro 35. Propiedades de los agregados para la mezcla 1.....	V
Cuadro 36. Propiedades del cemento Holcim.....	VI
Cuadro 37. Diseño de mezcla 1.....	VII
Cuadro 38. Granulometría del agregado fino para la mezcla 2.....	VIII
Cuadro 39. Granulometría del agregado grueso para la mezcla 2.....	VIII
Cuadro 40. Propiedades de los agregados para la mezcla 2.....	VIII
Cuadro 41. Propiedades del cemento Cemex.....	IX
Cuadro 42. Granulometría del agregado fino para la mezcla 3.....	XI
Cuadro 43. Granulometría del agregado grueso para la mezcla 3.....	XI
Cuadro 44. Propiedades de los agregados para la mezcla 3.....	XI

Miranda Villegas, José Mauricio.
Modelos de Desempeño en Pavimentos Rígidos
Proyecto de Graduación – Ingeniería Civil – San José. C.R.:
J.M. Miranda V., 2016
xiii, 114, [13]h; ils. col. – 43 refs.

RESUMEN

En este proyecto se caracterizaron agregados y cementos para tres tipos de mezclas diferentes, se realizaron ensayos estáticos y ensayos dinámicos de módulo dinámico y fatiga para obtener tres modelos de fatiga. Se desarrolló además, un modelo genérico de fatiga a partir de todos los ensayos de fatiga elaborados.

Se modeló una estructura de pavimento mediante el software ISLAB2000 y el programa ApRIGID 1.0. Los esfuerzos calculados proporcionaron relaciones de esfuerzo muy bajas, las cuales al aplicarles los modelos de fatiga calculados dan muchas repeticiones de carga admisibles por lo que se concluyó que un pavimento típico difícilmente va a fallar por fatiga, y se debe investigar los demás problemas por que fallan los pavimentos rígidos.

Se realizó una investigación sobre los procedimientos de diseño de la guía del MEPDG (*Mechanistic Empirical Pavement Design Guide*), se concluyó que para el desarrollo de metodologías mecanicistas aplicables a Costa Rica, tal como la guía de diseño empírico mecanicista de pavimento (CR-ME), es importante considerar todos los elementos que afectan el desempeño de los pavimentos rígidos, desde las características del tráfico, las condiciones climáticas, los aspectos concernientes al diseño estructural y las propiedades de los materiales.

ANÁLISIS DE PAVIMENTOS RÍGIDOS, DISEÑO MECANICISTA, ELEMENTO FINITO, FATIGA, ISLAB2000, MEPDG.

Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, PhD.

Escuela de Ingeniería Civil.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación

1.1.1 *El problema específico*

El agrietamiento por fatiga es uno de los principales problemas que ocurren en los pavimentos rígidos, actualmente este daño no es cuantificado en el país y por lo tanto no es tomado en cuenta por los diseñadores.

Un ejemplo de daño en un pavimento rígido, lo vemos en la Ruta Nacional 18, en el tramo comprendido entre Limonal y la intersección con la entrada principal a la planta de Cemex en Abangares, donde se han encontrado agrietamientos severos en algunas losas, las cuales se atendieron mediante sellos, sin embargo, el desarrollo de las grietas se incrementó tanto en longitud como en ancho, dejando sin función el sello aplicado, se encontraron anchos de grietas mayores a 5cm, lo que afecta directamente la condición de regularidad superficial y la condición estructural del pavimento al permitir el ingreso de agua a la estructura, afectando la capacidad de soporte y erosionando las capas de apoyo de las losas, cuya consecuencia es que se vayan agrietando con el paso de las cargas, además, existen escalonamientos importantes, cuyo impacto a los usuarios se trató de minimizar por medio de rellenos con mezcla asfáltica, sin embargo, su función no ha sido efectiva puesto que el agrietamiento y el escalonamiento continuaron desarrollándose de forma acelerada y la impermeabilización del pavimento respecto al agua superficial no se logró (Navas, 2014).

Además, recientes estudios del Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA) del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) revelan según las inspecciones realizadas en 2014 al proyecto *Ampliación y Rehabilitación de la Ruta Nacional No. 1, Carretera Interamericana Norte, Sección Cañas-Liberia* (en adelante llamado como proyecto Cañas-Liberia) que se sigue teniendo un riesgo latente de agrietamiento por problemas como el hecho de tener una base estabilizada con resistencia a la compresión uniaxial mayor al límite superior de la resistencia permitida lo que puede producir

agrietamientos considerables en la capa de material estabilizado, además, bajo la presencia de humedad podría provocar el arrastre de finos e incidir en el comportamiento de las losas a fracturamiento, descalce, entre otras (PITRA,2014).

Otro problema notado en el proyecto Cañas-Liberia que podría incidir en la formación de grietas es la presencia de una inadecuada transferencia de carga que implicaría deformaciones en los bordes de las losas. Por ejemplo, uno de los tramos del proyecto presentó grietas a un año de haber sido determinado que presentaba una eficiencia de transferencia menor al límite recomendado (PITRA, 2015).

Algunos modelos de fatiga para pavimentos rígidos que se han desarrollado son el MEPDG (*Mechanistic Empirical Pavement Design Guide*) de la AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*), el modelo PCA (*Portland Cement Association*), el modelo de cero mantenimiento de la *Federal Highway Administration* (FHWA) y el modelo calibrado mecanicista (*US Army Corps of Engineers*); no obstante, estos modelos no están calibrados para nuestro país, por lo que su uso directo podría provocar que los pavimentos presenten problemas de desempeño ya que no se conocen sus propiedades, por ello se debe iniciar un proceso de investigación que permita generar modelos de fatiga que se adapten a las condiciones del país.

1.1.2 Importancia

El desarrollo económico y bienestar social del país depende en gran medida de la infraestructura vial con que se cuente, se estima que en Costa Rica hay un retraso de 35 años en este tema (González, 2013). El análisis de los pavimentos rígidos como estructura para carreteras es una opción importante dado su reciente uso en vías tales como la ruta nacional 1 en la sección Cañas - Liberia de 50 Km de longitud.

Parámetros como el Índice de Regularidad Internacional (IRI) muestran este retraso en la calidad de los pavimentos costarricenses, los estudios del LanammeUCR en proyectos de pavimentos rígidos, como la ruta nacional 211 Zapote-San Francisco, San Francisco-La Colina y la sección de La ruta nacional 167 Librería Universal-La Salle indican que los valores de IRI en los proyectos costarricenses han sido mayores a los establecidos en las especificaciones

internacionales y superando casi en el doble los valores especificados en el CR-2010 (PITRA, 2014), para el proyecto Cañas-Liberia en caso de que el IRI supere el valor de 4.0m/Km, para un tramo particular, dicho tramo deberá ser demolido y reconstruido (CONAVI, 2011 citado por PITRA,2014). Cabe destacar que una mala condición funcional, como el IRI en este caso, afectará las condiciones estructurales eventualmente, entre ellas el fenómeno de fatiga.

Se propone con este trabajo encontrar modelos de fatiga, basados en ensayos de laboratorio y diseño mecanicista, que permitan predecir el futuro desempeño de los proyectos construidos con este tipo de pavimento. Además, el LanammeUCR, tiene el proyecto de elaborar una guía de diseño de pavimentos para Costa Rica por lo que la información que se concluya en este trabajo será un insumo más para esta guía.

A partir de los modelos generados, seguiría una segunda etapa de calibración de las condiciones de nuestro medio para decantar en una ley de fatiga aplicable a todos los pavimentos rígidos que se diseñen en el país, lo cual incidirá a largo plazo en el mejoramiento de la calidad del diseño de los pavimentos y por ende a tener una infraestructura vial más apropiada.

1.1.3 Antecedentes

En nuestro país, Monge (2013) implementó el primer ensayo de fatiga en pavimentos rígidos del país y comparó los resultados para mezclas de concreto convencional y concreto con fibras de polipropileno. El estudio concluye que este último tiene un mejor comportamiento a la fatiga, al menos para aplicaciones cercanas al esfuerzo a la ruptura del material.

También en Costa Rica Koss (2001) investigó el concepto de fatiga mediante cargas de impacto usando una polea y un peso para fallar losas de concreto, con este ensayo logró contar el número de golpes necesarios para llegar a la falla.

En Illinois (USA), Rao y Roesler (2005) Compilaron los distintos modelos de fatiga con su forma de definir la falla y el punto de la losa donde se calcularon los esfuerzos (Rao y Rolester 2005, citado por Monge, 2013).

Austroroads (*Australian and New Zealand Road Transport and Traffic Authorities*) (2012) publicó una guía con el procedimiento de los ensayos de módulo y fatiga en materiales cementados cargándolos en sus tercios medios.

En Chile, Serrano (2006), estudió el comportamiento de probetas cilíndricas de hormigón bajo la acción de cargas cíclicas aplicadas diametralmente y lo comparó con el ensayo a fatiga por flexo tracción. Finalmente, verificó que el método describe el comportamiento de fatiga del concreto y si podría ser utilizado directamente en pavimentos rígidos.

En Colombia, Boada y Reyes (2013) analizaron el comportamiento a la fatiga de una mezcla de concreto con módulo de resiliencia de 3,5MPa con adición de fibras plásticas. Concluyeron que debido al deterioro que sufren actualmente los pavimentos por fatiga, las nuevas tecnologías de pavimentos deberán estar orientadas a lograr nuevas redes de infraestructura vial que respondan eficientemente con el uso de materiales reciclables u otros que permitan construcción sostenible.

En España, Zanuy, Albajar y de la Fuente (2011) propusieron un modelo de fatiga para el concreto capaz de reproducir la evolución macroscópica del concreto con el número de ciclos; el modelo asume un comportamiento lineal dentro de un ciclo de carga, por lo que su respuesta dentro de cada ciclo depende de su módulo y de su deformación remanente.

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar modelos de fatiga para los materiales típicos en la elaboración de pavimentos rígidos de Costa Rica.

1.2.2 Objetivos específicos

- Desarrollar una revisión literal de los principales aspectos del diseño de Pavimento según la guía de diseño MEPDG, con énfasis en el diseño de Pavimentos de Concreto Simple Articulado o de Juntas.
- Determinar las propiedades de resistencia mecánica de tres mezclas de concreto de uso típico en pavimentos rígidos de Costa Rica.
- Elaborar una ecuación que modele la resistencia a la fatiga para cada uno de los diferentes tipos de mezclas de concreto utilizados, mediante ensayos de carga cíclica en vigas simplemente apoyadas cargadas en sus tercios medios.
- Elaborar un análisis mecanístico para cada una de las mezclas de concreto mediante la modelación de una estructura típica de pavimento rígido en un software de elemento finito con la configuración de cargas más críticas, para obtener los esfuerzos soportados por las losas de los pavimentos

- Aplicar los modelos de fatiga a las razones de esfuerzo encontradas mediante el análisis mecanicista de los pavimentos.

1.3. Delimitación del problema

1.3.1. Alcances

Se logró resumir información importante acerca de los modelos de fatiga en concreto desarrollados hasta la fecha y se recopilaron los aspectos más importantes considerados por la guía de diseño MEPDG, en específico para el diseño de pavimentos de concreto simple articulado (JPCP).

En cuanto a los ensayos de laboratorio se analiza el comportamiento a fatiga de tres mezclas de concreto. Se siguieron las normas ASTM (*American Society for Testing Materials*) para los ensayos estáticos y las recomendación que propone Austroads para los ensayos dinámicos.

Para el diseño de los pavimentos rígidos, se consideraron las propiedades de los materiales típicos de Costa Rica, además de las recomendaciones dadas por miembros de las empresas Holcim y Cemex, los cuales se consultaron previamente. Con la mezcla 3 se trató de imitar el concreto utilizado en el proyecto Cañas-Liberia, para lo cual de igual manera se consultó a la empresa FCC construcción, encargada de la construcción del pavimento.

Se utilizó la metodología AASTHO 93 para la revisión del diseño de pavimento para los distintos tipos de concreto. Se utilizó el software ISLAB 2000 y el software ApRIGID 1.0 para la obtención de los esfuerzos experimentados por el pavimento dada una configuración de carga definida, que tomó en cuenta un camión de diseño únicamente, el T3-S2.

A partir de los ensayos dinámicos de desarrollaron tres modelos de fatiga, los cuales se aplicaron a las razones de esfuerzo encontradas mediante la modelación de los pavimentos en software y se determinó así el número de repeticiones admisibles de carga que soportarían los pavimentos.

1.3.2. Limitaciones

La principal limitación es la reducida cantidad de muestras que se lograron elaborar y ensayar en el laboratorio, ya que lo ideal era contar con la mayor cantidad posible pero por razones de tiempo y recursos solo se trabajó con cantidades limitadas. Por lo tanto, se tiene una muestra pequeña para la gran cantidad de casos reales.

Las pruebas de laboratorio dependieron de la disponibilidad de los equipos del LanammeUCR, así por ejemplo no se pudo realizar los ensayos de abrasión en la caracterización de los agregados gruesos y los ensayos dinámicos se debieron posponer unas semanas mientras el Lanamme adquiría los accesorios adecuados para llevar a cabo estos ensayos en la máquina universal.

Para la elaboración de los especímenes de concreto tanto de los ensayos estáticos como dinámicos, se realizaron varias coladas durante varios días, lo cual, a pesar de seguir los procedimientos normados y hacer las correcciones por humedad correspondientes, se promueve la variabilidad en el concreto, lo que se hubiese podido reducir al utilizar una sola colada de concreto, lo cual no fue posible dada la capacidad máxima de la batidora y la gran cantidad de especímenes a elaborar.

No se consideró las variaciones de humedad de los especímenes en los ensayos dinámicos, lo cual pudo afectar los resultados, dado que todos los especímenes se fallaron a edades diferentes, alcanzando niveles distintos de humedad, los cuales no se determinaron experimentalmente.

La modelación mecánica parte de supuestos que no han sido calibrados para nuestro país, por ejemplo, no hay modelos calibrados de deterioro para nuestras condiciones, ni modelos confiables de las condiciones climáticas del país.

1.4. Metodología

La metodología que se siguió se muestra en la Figura 1, consta de tres etapas: una fase teórica, una fase experimental y una fase analítica.

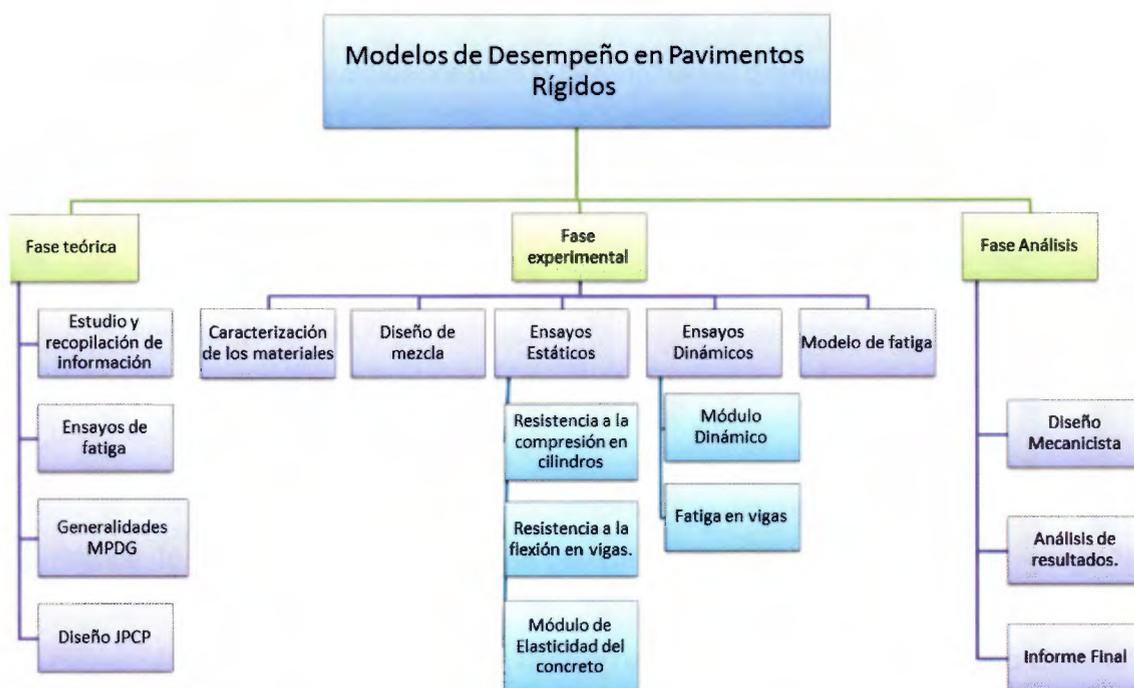


Figura 1. Metodología de trabajo

1.4.1. Fase teórica

Se realizó una revisión bibliográfica para recopilar información existente sobre el diseño de pavimentos rígidos, comportamiento del concreto en ensayos de fatiga y diseño mecanicista según la guía de diseño MEPDG. Para ello se consultó información de trabajos finales de graduación, publicaciones en línea, documentos oficiales de organismos internacionales y en las normas.

1.4.2. Fase experimental

Se caracterizaron los agregados y cementos utilizados en tres diseños de mezcla, uno de los concretos correspondía a los materiales y dosificaciones utilizadas en el proyecto Cañas-Liberia y los otros de acuerdo a fuentes de agregados y diseños que se les consultaron a representantes de las empresas Holcim y Cemex.

A estos agregados y al cemento se les caracterizó mediante la elaboración de probetas de concreto para los ensayos estáticos y dinámicos.

Se utilizaron los lineamientos de la norma ASTM C33/C33M para los ensayos del agregado.

La caracterización del agregado fino incluyó las siguientes pruebas:

- Métodos de Ensayo Normalizados para la Determinación Granulométrica de Agregados finos y gruesos (ASTM C136).
- Métodos de Ensayo Normalizados para determinar la Densidad Aparente ("Peso Unitario") e Índice de Vacíos (ASTM C29).
- Método de Ensayo Normalizado para Densidad, Gravedad Específica y Absorción de Agregado Fino (ASTM C128).
- Método de Ensayo Normalizado para Impurezas Orgánicas en Agregado Fino para Concreto (ASTM C40).

Para la caracterización del agregado grueso se elaborarán las siguientes pruebas:

- Método de Ensayo Normalizado para la Determinación Granulométrica de Agregados Finos y Gruesos (ASTM C136).
- Método de Ensayo Normalizado para determinar la Densidad Aparente ("Peso Unitario") e Índice de vacíos (ASTM C29).
- Método de Ensayo Normalizado para Densidad, Gravedad Específica y Absorción de Agregado Grueso (ASTM C127).

Para la caracterización del cemento se realizaron las siguientes pruebas:

- Método de Ensayo Normalizado para la Consistencia Normal de un Cemento Hidráulico (ASTM C187).
- Método de Ensayo Normalizado para el Tiempo de Fragua de un Cemento (ASTM C191).
- Método de Ensayo Normalizado para la Gravedad Específica de un Cemento Hidráulico (ASTM C188).
- Método de Ensayo Normalizado para la Resistencia a Compresión de un Cemento Hidráulico (ASTM C305, ASTM C1437 y ASTM C109).

Se fallaron especímenes a 7 días y a 28 días para cada tipo de mezcla. Se realizaron los siguientes ensayos:

- Método de Ensayo Normalizado para Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto (ASTM C39).
- Método de Ensayo Normalizado para Resistencia a Flexión en Vigas de Concreto (ASTM C78).

- Método Estándar de Ensayo para Módulo de Elasticidad Estático y Relación de Poisson del Concreto (ASTM C469).

Luego se elaboraron ensayos dinámicos:

- Módulo dinámico del concreto.
- Fatiga en vigas de concreto.

Estos ensayos se realizaron tomando como referencia las recomendaciones de Monge (2013), que a su vez se basan en el informe de Austroads (2012) *Preliminary Investigation of the Influence of Micro-cracking on Fatigue Life on Cemented Materials*.

A partir de los datos obtenidos en los ensayos de fatiga se obtuvo para cada tipo de concreto una curva donde se graficó el número de repeticiones contra una razón de esfuerzo aplicado y a partir de esas curvas se determinaron los modelos de fatiga.

1.4.3. Fase de Análisis

Una vez obtenidos los modelos de fatiga se realizó un análisis mecanicista utilizando el software ISLAB2000, por medio del cual se obtuvieron las respuestas del pavimento (esfuerzos y deformaciones) de acuerdo a las solicitaciones a las que se encuentra sometido el material en su vida de servicio. Los resultados obtenidos se incorporaron en los modelos de fatiga para estimar el desempeño en cada mezcla estudiada, así como probar la congruencia con respecto a otros modelos internacionales. Finalmente, se utilizó el Software ApRIGID1.0 desarrollado por el LanammeUCR y se compararon los resultados con los obtenidos mediante el ISLAB2000.

1.5. Marco teórico

1.5.1. Pavimentos rígidos

Los pavimentos rígidos utilizan una capa de concreto hidráulico como superficie de ruedo, que se encuentra sobre una base granular que a su vez se apoya sobre la subrasante, pueden llevar acero de refuerzo en las losas y acero en las juntas, el cual contribuye a controlar las deformaciones en toda la estructura y mejorar la eficiencia en la transferencia de cargas. La Figura 2 muestra los elementos de un pavimento rígido típico.

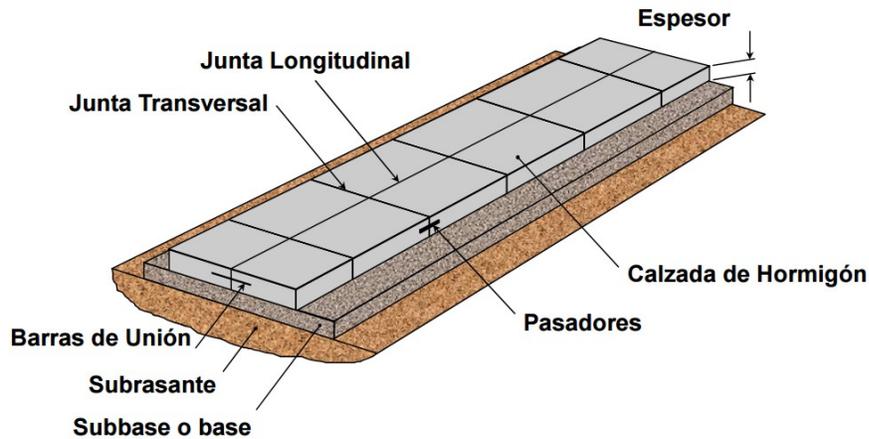


Figura 2. Elementos principales de un pavimento rígido.

Fuente: Calo, 2012

Este tipo de pavimentos distribuye de mejor manera las cargas verticales hacia la subrasante debido a su alta rigidez y módulo de elasticidad de modo que la presión de contacto entre la losa y la base es sólo una pequeña fracción de la carga superficial. La capacidad de carga está determinada por el desempeño de la losa ante las deformaciones producto de las cargas repetitivas del paso de los vehículos, efecto que le genera tensiones durante su uso, y que la llevan a fallar por fatiga. Se considera que el efecto de deterioro del pavimento ocurre cuando la losa presenta agrietamiento por cargas, sin embargo, otros criterios de comportamiento del pavimento, buscan mantener un estado de serviciabilidad adecuado durante su utilización, evaluando la rugosidad de la superficie a través del IRI y otros deterioros usuales como lo es el escalonamiento y grietas en la esquina.

Las características estructurales están íntimamente relacionadas con las de los materiales empleados muy particularmente las propiedades mecánicas, por lo que debe contarse con un diseño de mezcla que tome en cuenta las características de los agregados y aditivos que se utilizarán para favorecer el óptimo desempeño del pavimento, así como la elaboración de los ensayos necesarios para asegurar la calidad e inalterabilidad de los materiales.

Existen diferentes tipos de pavimentos rígidos, diferenciados principalmente por el tipo de refuerzo que poseen. Los principales tipos de pavimento son:

1.5.1.1. Pavimento de Concreto Simple Articulado o de Juntas (JPCP)

Este es el tipo más común de pavimento rígido, JPCP controla grietas dividiendo el pavimento en losas individuales separadas por juntas de contracción. Las losas son típicamente de un carril de ancho y entre 3,7 m (12 ft.) y 6,1 m (20 ft.) de largo. JPCP no utiliza ningún tipo de refuerzo de acero, pero utiliza dovelas y barras de amarre. (Pavement Interactive, 2009). La Figura 3 muestra la vista superior y lateral de un pavimento JPCP típico.

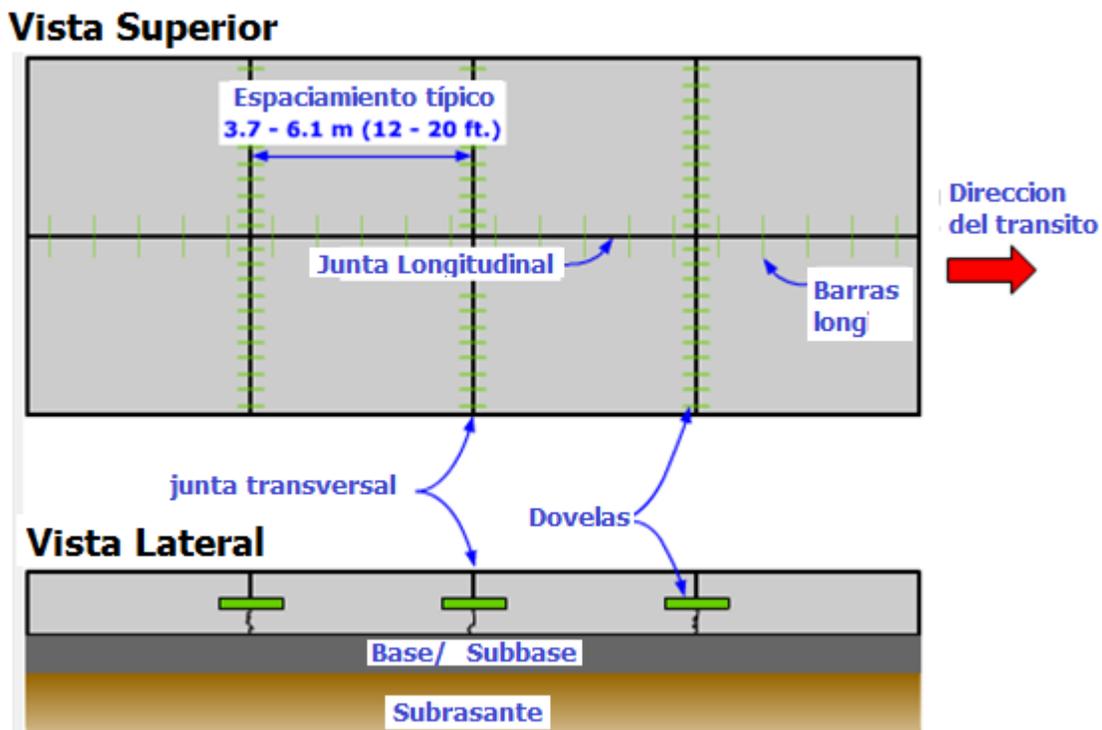


Figura 3. Pavimento de Concreto Simple Articulado o de Juntas

Fuente: modificado de Pavement Interactive, 2009.

1.5.1.2. Pavimento de Concreto Reforzado Articulado (JRCP)

Al igual que con JPCP, JRCP controla grietas dividiendo el pavimento en losas individuales separadas por juntas de contracción. Sin embargo, estas losas son mucho más largas, hasta 15 m (50 ft.), tal como se muestra en la Figura 4, por lo que JRCP utiliza acero de refuerzo dentro de cada losa para controlar el agrietamiento dentro de la losa. Este tipo de pavimento

ya no se construye en los EE.UU. debido a algunos problemas de rendimiento a largo plazo (Pavement Interactive, 2009). La Figura 4 muestra la vista superior y lateral de un pavimento JRCP típico.

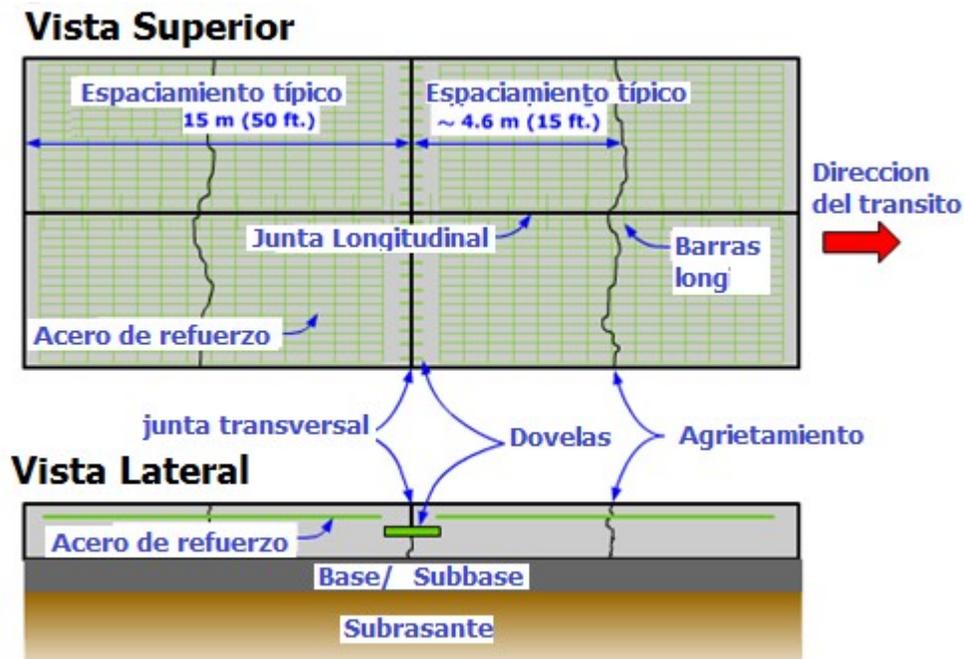


Figura 4. Pavimento de Concreto Reforzado Articulado (JRCP)

Fuente: modificado de Pavement Interactive, 2009

1.5.1.3. Pavimento de Concreto Continuamente Reforzado (CRCP)

Este tipo de pavimento rígido utiliza acero de refuerzo en lugar de juntas de contracción para el control de la fisuración. Las grietas típicamente no aparecen y el acero se mantiene muy junto con el acero de refuerzo subyacente, de 1,1 a 2,4 m (Pavement Interactive, 2009). La Figura 5 muestra la vista superior y lateral de un pavimento CRCP típico.

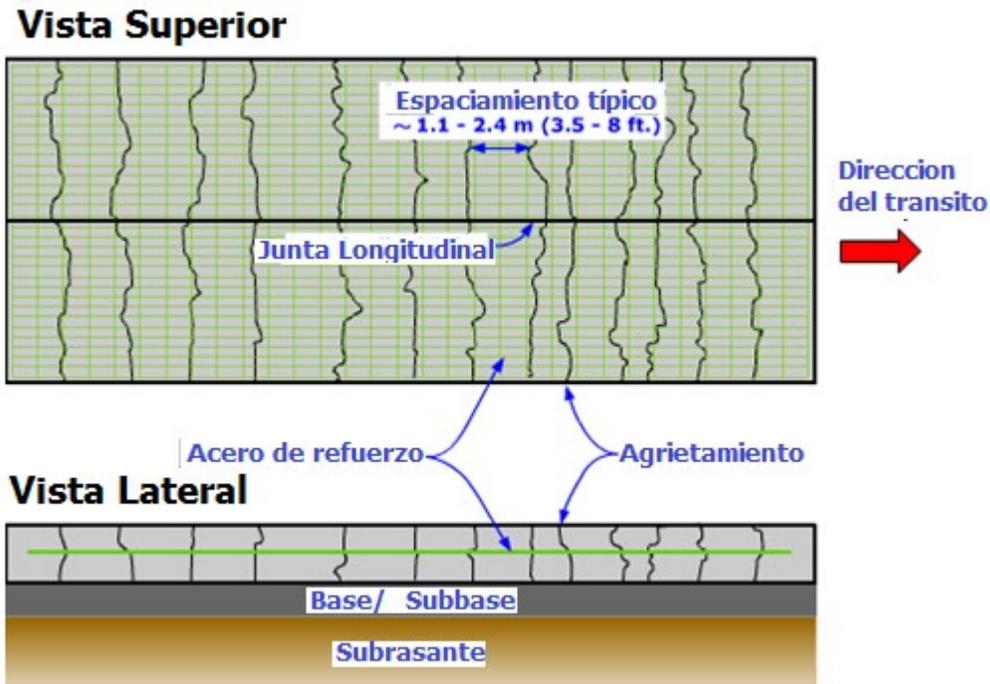


Figura 5. Pavimento de Concreto Continamente Reforzado (CRCP)
Fuente: Pavement Interactive, 2009

1.5.2. Pavimento Rígido del Proyecto Cañas- Liberia.

Como una forma de ejemplificar la condición actual de los pavimentos rígidos en el país, se resume en este apartado, los principales hallazgos encontrados por el LanammeUCR en las inspecciones realizadas al proyecto Cañas-Liberia, tomando como referencia el informe "Evaluación de la calidad de los materiales, la capacidad estructural y funcional de la losa de rodamiento y aspectos constructivos" presentado en noviembre de 2015 por el PITRA e informes anteriores análogos a este. Los principales hallazgos y observaciones se citan a continuación:

- a. Los valores de resistencia para la base estabilizada incumplen el promedio indicado:

Este problema podría implicar deformaciones en los bordes de las losas por agrietamientos en la esquina, además afectaría el desempeño por erosión al disminuirse el módulo de reacción (k), por lo que recomiendan realizar una adecuada formulación del diseño de la base estabilizada para encontrar el porcentaje óptimo de cemento que se debe agregar al material (PITRA, 2015).

- b. El concreto con módulo de ruptura de 50 kg/cm² a los 28 días cumple con las especificaciones CR-2010 (Manual de especificaciones para la construcción de carreteras, caminos y puentes)
- c. Las reparaciones de las losas de concreto recuperan la capacidad estructural del material:

Se repararon grietas mediante el uso de un epóxico, lo cual se comprobó mediante pruebas a tensión diametral (prueba brasileña), el promedio de los valores de resistencia de los núcleos que presentaban agrietamiento es similar a la resistencia de los núcleos sanos (PITRA, 2015), mediante el uso de correlaciones llegaron a la misma conclusión para los valores de módulo de ruptura.

- d. Las reparaciones recuperan la capacidad de las losas de rodamiento del pavimento: Mediante ensayos de deflectometría de impacto se determinó que los valores de módulo son mayores a los esperados en las losas sanas, mientras que en las losas reparadas se da una disminución del 9% en el módulo con respecto al especificado en el cartel (PITRA, 2015).

- e. La transferencia de carga en las losas es satisfactoria.
- f. El coeficiente de fricción (*Grip Number*) de la carretera es menor al mínimo recomendable:

Se observó que se omite el uso de una manta de yute para obtener la microtextura según el CR-2010. Se monitoreo las condiciones de fricción dando resultados en su mayoría menores al mínimo recomendable (0,5) lo cual representa una condición deslizante y un alto riesgo para la seguridad de los usuarios (PITRA, 2015)

- g. El índice de condición del pavimento (PCI) se encuentra por debajo al esperado para un proyecto nuevo:

Se determinó un PCI en una condición Q2, la cual a pesar de ser una buena condición no es la calificación que se espera para un proyecto nuevo, la cual debe rondar entre 100-90 (PITRA, 2015).

- h. Se detectaron prácticas constructivas inadecuadas:

Se detectaron cortes irregulares que pueden provocar grietas en los planos en los que se genera el descuadre. Se notaron dovelas dobladas y canastas para la colocación de las dovelas mal instaladas y en condiciones no optimas (PITRA, 2015)

En cuanto a las inspecciones anteriores se presentaron 3 informes, uno en agosto de 2013 (basado en muestreos de enero a marzo de 2013), otro en enero de 2014 (muestreos de abril a junio de 2013) y uno en mayo de 2014 (muestreos de todo el año 2013). Destacan los siguientes puntos:

a. Calidad del material de préstamo colocado en el proyecto:

En el informe de agosto 2013 se reportó que las muestras incumplían en la granulometría (PITRA, 2013). Para el informe de enero 2014, se determinó que las muestras tienen porcentajes por encima del valor permitido en la granulometría (PITRA,2014), y por último en el informe de mayo 2014 el material cumple en general con los requisitos establecidos en el Cartel de Licitación del proyecto, tanto en granulometría como para el valor requerido de CBR (PITRA,2014).

b. Calidad del material de subbase colocado en el proyecto:

En agosto de 2013 se tenía incumplimientos en análisis granulométrico, CBR e índice de durabilidad (PITRA, 2013). Para enero de 2014 se reportó valores por debajo del límite establecido en la Malla 1½" (PITRA, 2014). Por último, en mayo de 2014 los porcentajes estimados fuera de los límites de especificación se encuentra por arriba del establecido (PITRA, 2014).

c. Calidad del material de base estabilizada colocado en el proyecto:

En agosto 2013 los resultados son en general mayores al promedio establecido en el Cartel de Licitación (PITRA, 2013), para enero 2014 se repite este resultado y para mayo de 2014 se logra determinar que más del 55% de todos los valores de resistencia se encuentran por encima del valor considerado como máximo (50kg/cm^2), además, aproximadamente un 20% de los datos analizados tienen una resistencia entre 70 y 110 kg/cm^2 (PITRA, 2014).

d. Resultados de medición del IRI sobre secciones de Base Estabilizada:

En el informe de agosto de 2013 el valor del IRI característico promedio calculado en secciones del proyecto a nivel de base estabilizada es de 5,0m/km con una base de medición de 200 metros (PITRA, 2013). Para enero 2014 el valor del IRI es de 3,5m/km con una base de medición de 200 metros (PITRA, 2014).

e. Calidad del concreto para pavimento rígido:

Según el informe del LanammeUCR, para enero 2014 los resultados del concreto para la superficie de ruedo presentan valores dentro de los límites establecido para los parámetros de temperatura, revenimiento y resistencia a la flexo tracción (PITRA, 2014). Para mayo de 2014 los valores de resistencia a la flexo tracción en general cumplen con el límite mínimo de 50 kg/cm², establecido en el Cartel de Licitación del proyecto. Para el caso del revenimiento, presenta una alta variabilidad perceptible a partir del mes de octubre de 2013 en los resultados de verificación de calidad y del LanammeUCR. Para este parámetro se encuentran valores desde 15 mm hasta 90 mm (PITRA, 2014)

f. Resultados de medición del IRI sobre secciones de Pavimento Rígido

Para enero de 2014 el valor del IRI calculado en secciones del proyecto presenta en general valores mayores a los requeridos por la especificación (PITRA, 2014)

1.5.3. Diseño de pavimentos rígidos

El diseño estructural de un pavimento rígido está condicionado por una serie de factores que determinan su desempeño. En Costa Rica se suele utilizar la metodología de AASTHO 93 la cual se basa en los resultados de las pruebas AASTHO *Road Test (American Association of State Highway Officials)*, desarrolladas entre 1958 y 1960 en Ottawa, Illinois y revisadas en 1972, 1981 y 1986; pruebas que determinaron correlaciones empíricas entre el comportamiento del pavimento y las cargas aplicadas.

La metodología de diseño AASTHO 93 para pavimentos rígidos requiere de parámetros como el módulo de ruptura del concreto, el coeficiente de transferencia de carga, nivel de confianza y número de ejes equivalentes para obtener finalmente un espesor de losa adecuado. En la metodología de AASTHO 93 se incorpora la revisión del diseño de

sobrecapas, diseño de subbases 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.(Cornejo y Velásquez, 2009).

La PCA propuso en 1984 un método de diseño mecánico-empírico, desarrollado para pavimentos de concreto. Este método considera la erosión de la sub-base por debajo de las losas y la fatiga del pavimento de concreto. Además, el método fue desarrollado mediante un 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. La metodología permitió considerar el uso de dovelas en juntas y de elementos para dar apoyo lateral a la losa de concreto. Los factores de diseño son el módulo de ruptura de concreto, el módulo de reacción, el período de diseño, las frecuencias y encuesta de carga de los camiones. El método de la PCA no considera la serviciabilidad inicial ni la final. (Monge 2013)

La *Federal Highway Administration* propuso en los años noventa un programa de investigación para desarrollar una guía metodológica de diseño de pavimentos con un fundamento mecanicista-empírico.

En el año 2002 la AASHTO publicó la Guía de Diseño de Pavimentos Mecánica-Empírica (MEPDG), sin embargo, fue hasta 2011 que luego de una serie de revisiones, la misma fue adoptada por AASTHO y presenta como una metodología oficial. La MEPDG incorpora las propiedades del comportamiento de los materiales en el procedimiento de diseño, esta guía supera algunas de las deficiencias que tenían las anteriores con respecto al incremento del tráfico y su caracterización, deficiencias climáticas, constructivas, de desempeño y de confiabilidad, además, toma en cuenta las condiciones del suelo y se propone un diseño que cumpla con los criterios de evaluación tanto estructurales como de servicio. Los datos específicos para cada proyecto, pueden ser obtenidos mediante pruebas de laboratorio o en campo mediante ensayos destructivos y no destructivos. En Costa Rica no se ha utilizado esta metodología pues no se ha calibrado para los materiales que se encuentran en el país.

1.5.4. Fallas principales en pavimentos rígidos

En pavimentos de concreto, los deterioros que se consideran típicamente son el agrietamiento por fatiga, el escalonamiento entre losas y los desprendimientos de bloque.

Para el caso del agrietamiento por fatiga, éste se puede propagar iniciando a partir del fondo de la losa o bien desde la superficie. El inicio del agrietamiento se debe al desarrollo de esfuerzos críticos de tensión en la losa de concreto en ciertas ubicaciones dentro del pavimento (Garnica y Correa, 2004).

La falla por fatiga ocurre ante la acción repetitiva de cargas dinámicas sobre el concreto, cargas que no son lo suficientemente grandes para causar la falla en una sola aplicación. De este modo, por encima de un cierto nivel de esfuerzo se presenta un daño estructural que inducirá a la formación de micro fisuras en el material que luego lo llevan a la ruptura.

En el caso de la agrietamiento por fatiga, este se debe a un espesor de calzada insuficiente o separación de juntas excesiva, reflexión de grietas de capas inferiores o losas contiguas, pérdida de soporte por erosión y asentamientos diferenciales. (Calo, 2012)

La falla de erosión por bombeo y escalonamiento se produce por el movimiento del agua (con material en suspensión) ubicada debajo de la losa o su eyección hacia la superficie como resultado de la presión generada por la acción de las cargas. Se debe a la presencia de material fino capaz de entrar en suspensión (arenas finas y limos), disponibilidad de agua en las capas inferiores del pavimento y deflexiones excesivas en bordes y esquinas (Calo, 2012).

CAPÍTULO II. INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA

En los pavimentos rígidos la falla por fatiga es uno de los principales problemas a enfrentar, esta ocurre ante la acción repetitiva de cargas dinámicas sobre el concreto. Los efectos de la fatiga se denotan en el agrietamiento que presenta la losa de concreto y que se puede propagar iniciando a partir del fondo de la losa o bien desde la superficie.

Algunos factores que afectan la fatiga son directamente proporcionales a su resistencia, tales como la relación agua-cemento y el tipo o cantidad de cemento; otros factores son el número de aplicaciones de carga, el espesor de la losa de concreto, el espaciamiento entre juntas transversales, el apoyo en el borde de las losas, el apoyo de la subrasante, aditivos, tiempo de curado, edad del concreto, la resistencia y módulo de ruptura (Aguas, Gómez, y Sesma, 2002). El módulo de ruptura es el esfuerzo de tensión máximo que se alcanza en la fibra extrema sometida a tensión. Un incremento en el módulo de ruptura del concreto resulta en una reducción de los agrietamientos de la losa.

Las propiedades de la fatiga de los materiales pueden ser determinadas a partir de ensayos de simulación en el laboratorio. El equipo para un ensayo de fatiga consiste en una viga cargada en sus tercios medios sometida a carga dinámica. El criterio para determinar las leyes de fatiga consiste en someter múltiples muestras a deformaciones controladas y calcular el ciclo de ruptura cuando el módulo de elasticidad se reduce al 50% de su valor inicial. (Reyes, 2011)

2.1. Modelos de deterioro

El proceso de caracterizar el fenómeno de fatiga ha conllevado el uso de modelos de deterioro por fatiga que relacionan el número de repeticiones admisibles de carga $N_{\text{admisible}}$ con el nivel de esfuerzos aplicado antes de la falla. La relación de esfuerzos SR es definida como el cociente entre el esfuerzo de tensión máximo esperado en el fondo de la losa σ y el valor de la resistencia a la tensión del concreto medida con base en el módulo de ruptura MR (Córdoba, 2012)

$$SR = \frac{\sigma}{MR} \quad (1)$$

Al relacionar estas variables en una gráfica semilogarítmica, con el número de ciclos de falla como abscisa y el nivel de esfuerzos como ordenada, se obtiene una recta de cuya extrapolación se infiere que aun trabajando a niveles bajos de esfuerzo, el concreto puede

fallar por fatiga si el número de ciclos de carga-descarga es lo suficientemente grande, tal como se muestra en la Figura 6.

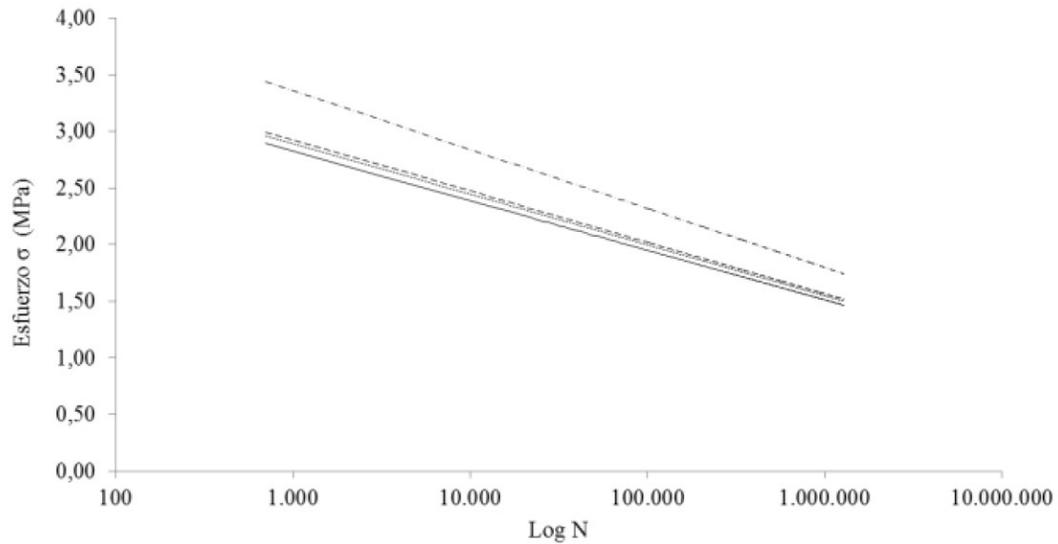


Figura 6. Modelo de fatiga

Fuente: Boada y Pérez, 2010

El número de ciclos de carga y descarga depende básicamente del nivel de esfuerzos máximo aplicado, de manera tal que conforme disminuye este nivel de esfuerzos se incrementa el número de ciclos que el concreto puede soportar. Aun trabajando a niveles de esfuerzos muy bajos, el concreto puede fallar por fatiga si el número de ciclos de carga y descarga es lo suficientemente grande. La Figura 7 muestra el montaje de un ensayo a flexión, mismo que se utiliza para los ensayos a fatiga.



Figura 7. Montaje de ensayo a flexión

Fuente: Instron 2014

El módulo de ruptura se calcula como (Gutiérrez, 2003):

$$MR = \frac{PL}{bd^2} \quad (2)$$

Si la falla ocurre por fuera del tercio medio pero no está separada de él por más de una longitud equivalente al 5% de la luz libre, el módulo de ruptura debe ser calculado así (Gutiérrez, 2003):

$$MR = \frac{3Pa}{bd^2} \quad (3)$$

Donde,

MR= Módulo de ruptura (MPa).

P= carga máxima aplicada a la viga (N).

L= longitud del claro (mm).

b= ancho de la viga (mm).

d= profundidad promedio de la cara fracturada (mm).

a= distancia promedio entre la línea de fractura y el soporte más cercano medido en la superficie de tensión de la viga (mm).

A medida que aumenta la resistencia a la compresión del concreto también aumenta su resistencia a la flexión, sin embargo la relación no es lineal sino parabólica. El módulo de ruptura presenta valores entre el 10 y 20% de la resistencia a la compresión. Una relación aproximada es la siguiente (Gutiérrez, 2003):

$$MR = k \sqrt{f'_c} \quad (4)$$

donde,

MR: Módulo de ruptura.

f'_c : Resistencia a la compresión en kg/cm^2

K: Un factor que está entre 2,0 y 2,7. El A.C.I recomienda 2,0.

El esfuerzo aplicado se calcula a partir de la carga máxima que fue aplicada a la viga durante el ensayo de la sección del elemento.

$$\sigma = M/S \quad (5)$$

M= Momento máximo (Kg cm)

S= Módulo de sección (cm^3).

2.1.1. Repeticiones de Carga

El ensayo del fatiga consiste en la aplicación de pulsos de carga cíclica haversiana, es decir ciclos donde el pico negativo es cero. Esto permite modelar el efecto de las cargas de tránsito sobre las losas de concreto, ya que someten a este a cargas en un sentido y no en el otro, por lo que se simula la condición real de los pavimentos sufriendo tensión ante el paso de las cargas vehiculares pero no compresión en el otro sentido.

Durante el ensayo de fatiga se recomienda aplicar entre el 60% y el 90% de la carga de ruptura por flexión determinada previamente, a una frecuencia de 2 Hz. Cuando se presenta el tránsito de vehículos sobre las losas de concreto, las cargas llevan al material a comportarse dentro del rango lineal elástico, lo que implica que su comportamiento no depende de la frecuencia de aplicación de la carga. (Monge, 2013)

Mediante este ensayo se puede conocer el número de ciclos requeridos y así obtener la curva de fatiga.

2.1.2. Ecuación de fatiga en Costa Rica

En el trabajo final de graduación "*Evaluación del Comportamiento a la fatiga de una mezcla de Concreto MR-4,5MPa con adición de Fibras de Polipropileno*", se obtuvieron dos ecuaciones, una para concreto convencional y una para concreto modificado con 900g de polipropileno por metro cúbico de mezcla, las cuales son respectivamente la ecuación 6 y 7. (Monge, 2013)

$$\text{Log}N = \log(5,451) - 24,6 \log(SR) \quad (6)$$

$$\text{Log}N = \log(25,21) - 14,6 \log(SR) \quad (7)$$

2.1.3. Modelos de fatiga

El concepto de daños por fatiga, publicado por Miner (1945), ha sido ampliamente utilizado para el diseño de pavimentos y en su evaluación. Este método supone que un pavimento de concreto tiene un tiempo de vida por fatiga finito y puede resistir un número máximo de aplicaciones de carga (N) de una carga de tránsito dada antes de que se presente la fractura. Cada carga individual aplicada por el tránsito (n) decrece la vida del pavimento en una cantidad infinitesimal (Garnica, 2002 citado por Serrano, 2006).

La hipótesis de Miner permite la suma de daños por fatiga de las cargas de diferentes magnitudes y en virtud de una multitud de condiciones ambientales. Según la hipótesis de Miner, los materiales deben fracturarse cuando el daño es igual a 1, aunque en virtud de un sistema calibrado, esta suma de daño no necesariamente tiene que ser la unidad.

Hay una amplia aceptación de la hipótesis de Miner en la ingeniería de pavimentos, sin embargo, los investigadores han encontrado que la suma lineal de daño no es necesariamente válida, especialmente para la carga de amplitud variable efectuadas en laboratorio. Por su parte, la aplicación de la teoría de daño acumulado junto con la calibración de campo ha dado resultados razonables. (Sandoval, 2008)

Algunos de los modelos de fatiga más importantes se describen a continuación:

a. Modelo Cero Mantenimiento

Se desarrolló una relación entre el número de aplicaciones de esfuerzos para que ocurra la falla y la relación de esfuerzos en pavimentos de concreto con juntas planas. La información de fatiga se obtuvo de tres estudios y 140 pruebas de vigas incluidas. (Darter, 1977 citado por Serrano, 2006).

b. Modelo Calibrado Mecanicista (1958)

Desarrollado por el cuerpo de ingenieros (COE), basado en información sobre pruebas de tránsito acelerado, definieron la falla como el momento en que el 50% de la losa estaba agrietada. Calcularon esfuerzos por carga y por temperatura en el borde de la losa y utilizaron un programa de elemento finito llamado ILLI-SLAB (Sandoval, 2008).

c. Modelo ERES/COE

Desarrollado por el COE, definieron la falla como el 50% de agrietamiento, usaron losas de concreto, un software llamado H-51 y un factor de 0,75 para considerar la transferencia de carga y las condiciones de soporte. (Sandoval, 2008)

d. Modelo Foxworthy

Desarrollado por el COE y usando 50% de agrietamiento como falla. Usaron losas y un programa de elemento finito llamado ILLI-LOSA

e. Modelo PCA

El modelo PCA utiliza relaciones similares al modelo de Cero Mantenimiento. Sin embargo, asume un límite de fatiga de 0.45 para pavimentos de concreto. Eso es, a un nivel de esfuerzos por debajo de 0.45, se asume que el daño por fatiga no ocurre.

Serrano, Calo y Monge, han recopilado los principales modelos de fatiga los cuales se muestran en el cuadro 1.

Cuadro 1. Modelos de fatiga

Modelo	Ecuación
Miner (1945)	$\text{Daño} = \sum \frac{n_i}{N_i}$ <p>n_i= número de repeticiones de carga aplicadas bajo la condición i N_i= número de repeticiones de carga permisibles hasta la falla por fatiga bajo la condición i</p>
Modelo PCA	<p>Para $SR \geq 0,55$ $\text{Log } N = 11,737 - 12,077 \text{ SR}$</p> <p>Para $0,45 < SR < 0,55$ $N = \left(\frac{4,2477}{SR - 0,4324} \right)^{3,268}$</p> <p>Para $SR \leq 0,45$ $N = \text{no limitado}$</p>
Modelo cero mantenimiento	$\text{Log } N = 17,61 - 17,6(SR)$
Modelo Calibrado Mecanicista	$\text{Log } N = \left[\frac{-SR^{-5,367} * \log(1 - P)}{0,0032} \right]^{0,2276}$
Modelo Foxworthy	$\text{Log } N = 1,323 \left(\frac{1}{SR} \right) + 0,588$
Modelo ERES/COE	$\text{Log } N = 2,13 \text{ SR}^{-1,2}$
Modelo ARE (1977)	$\text{Log } N = \log(23440) - 3,1 \log(SR)$
Modelo RISC	$\text{Log } N = \log(22209) - 4,29 \log(SR)$
Modelo Vesic	$\text{Log } N = \log(22500) - 4,4 \log(SR)$
Modelo ACPA	$\text{Log } N = \log \left(\frac{-SR^{-10,24} * \log(S)}{0,0112} \right)^{0,217}$

Fuentes: Serrano, 2006; Calo, 2012 y Monge, 2013

2.2. Diseño Mecánico-Empírico

El diseño de pavimentos constituye a grandes rasgos el diseño geométrico de la carretera, el diseño estructural, que se refiere a los espesores y tipos de capas, y el diseño de mezcla. El diseño estructural tiene como objetivos evitar fallas prematuras, durabilidad, seguridad, buena transitabilidad y considera futuras rehabilitaciones y la percepción de los usuarios. Los métodos tradicionales de diseño de pavimentos suelen ser empíricos, con deficiencias como que las ecuaciones eran producto de regresiones aplicables a lugares con materiales y condiciones similares a la zona de origen de dichas metodologías. Por su parte el diseño mecanicista tiene un enfoque puramente científico en el que se consideran las respuestas mecánicas de la estructura ante las cargas y las propiedades fundamentales de los materiales. El componente empírico del diseño está basado en resultados de experimentos o experiencia, se requiere de muchas observaciones para establecer vínculos entre las variables de diseño. Por lo tanto, el diseño mecánico empírico incorpora la determinación de la respuesta del pavimento debido a las cargas aplicadas mediante modelos matemáticos y a su vez relaciona la respuesta observada del pavimento con su estructura. Algunas ventajas adicionales es que utiliza distintos tipos de carga, cuantifican el impacto en la estructura, utilizan los materiales disponibles de manera más eficiente, realizan predicciones confiables, da una mejor evaluación de los aspectos constructivos, incluye efectos ambientales como el envejecimiento de los materiales y da una mejor definición de las propiedades de las capas existentes (Diseño de Pavimentos, 2015).

La implementación de los conceptos mecanicistas necesita de la disponibilidad de equipos modernos de laboratorio y campo para la evaluación de las propiedades, la calibración y validación de los modelos de deterioro. Se requiere el monitoreo de tramos de pavimentos representativos que permita la determinación de los coeficientes de ajuste necesarios para predecir, con la confiabilidad necesaria, la evolución del pavimento, lo anterior mediante una base de datos representativa con al menos cuatro años de mediciones de un programa permanente de monitoreo (Garnica y Correa, 2004).

Por lo tanto, en los modelos mecánico-empíricos el deterioro es modelado de forma incremental, de modo que se divide el periodo de diseño en incrementos y los cambios a través del tiempo son dirigidos a la resistencia del material, a la humedad y temperatura estacional y a las variaciones en el tráfico. El daño se suma usando la ecuación de Miner (ver Cuadro 1).

Usualmente las respuestas estructurales se analizan mediante algún software que utilice elemento finito, sin embargo, en Costa Rica, Quirós (2015) desarrolló el tema de las respuestas mecánicas con una alternativa al elemento finito, al usar un sistema de redes neurales artificiales (ANN por sus siglas en inglés). Las redes neurales artificiales son usadas comúnmente para el modelado de datos y análisis estadístico, tienen un rol común de ser una alternativa a técnicas de análisis de grupos y regresión no lineal. Las ANN son particularmente útiles en problemas de clasificación, predicción e identificación de patrones (Quirós, 2015). Se han desarrollado múltiples redes neurales para predecir respuestas mecánicas en pavimentos de concreto de pistas de aterrizaje y retrocálculo de módulos de diversas capas de pavimentos rígidos, para la predicción de esfuerzos críticos en losas de pavimentos rígidos. Entre las ventajas que ofrecen se encuentra una elevada confiabilidad de los resultados que difieren menos de un 0,4% con las soluciones de elemento finito (Quirós, 2015). Los resultados de Quirós fueron satisfactorios al verificar las capacidades de este tipo de modelos para el problema de predecir una variable a partir de un conjunto de regresores; al comparar con regresiones lineales calibradas, observó una reducción sustancial de los errores promedios asociados; concluye entonces que los modelos son una alternativa sumamente precisa y relativamente rápida. (Quirós, 2015)

2.3. Generalidades de la guía de diseño MEPDG

La guía de diseño MEPDG incluye procedimientos para el diseño de pavimentos usando parámetros de diseño comunes como el tráfico, la subrasante, el ambiente y la confiabilidad. A continuación se resumen los principales aspectos de la guía de diseño MEPDG, con énfasis en el diseño JPCP, en general el procedimiento de diseño incluye los siguientes pasos:

- Preparar un diseño preliminar con las condiciones específicas del sitio tales como tráfico, clima y materiales
- Establecer criterios para un desempeño aceptable del pavimento al final del período de diseño. Por ejemplo, niveles aceptables de escalonamiento, agrietamiento e IRI.
- Seleccionar el nivel deseado de confiabilidad para cada uno de los indicadores de desempeño aplicables.
- La guía de diseño MEPDG utiliza un software en el cual se procesan los datos de entrada para obtener los valores mensuales del tráfico, del material y los insumos climáticos necesarios en las evaluaciones de diseño, luego el programa calcula las respuestas

estructurales (esfuerzos y deformaciones) utilizando modelos de elemento finito para cada incremento de daño

- Determinar el daño acumulado en cada mes de todo el período de diseño.
- Predecir la regularidad superficial en función del IRI inicial, deterioros que ocurren a través del tiempo y factores del sitio al final de cada incremento en el tiempo.
- Evaluar el desempeño esperado del diseño preliminar a un nivel de confiabilidad dado.
- Modificar el diseño y repetir los últimos pasos hasta que el diseño cumpla con los criterios establecidos.

2.3.1. Insumos del diseño preliminar y condiciones del sitio

El procedimiento de diseño ofrece la posibilidad de considerar una amplia variedad de arreglos estructurales y características de diseño para satisfacer los criterios de desempeño. El diseñador debe proveer insumos para las condiciones del sitio de proyecto incluidas las propiedades de la subrasante, el tráfico y los datos climáticos.

Además en el proceso de diseño se deben considerar la sensibilidad del comportamiento del pavimento a una entrada dada. Las entradas de diseño para el software del MEPDG son: el número promedio de cada tipo de eje por hora; las temperaturas en 11 nodos espaciados uniformemente en la capa concreto por cada hora; la humedad relativa media mensual, la resistencia de la capa de concreto y su módulo, el módulo de la base y la subrasante efectiva. El módulo de ruptura, la resistencia a la compresión y resistencia a la tracción indirecta para cada mes del período de análisis se puede determinar por medio de entrada directa o utilizando el modelo por defecto de ganancia de resistencia del concreto.

2.3.2. Modelo de respuesta estructural

El software utilizado es ISLAB2000, el cual se usa en conjunto con redes neuronales para poder hacer un análisis incremental, mes a mes, para ello, las cargas de tráfico se dividen en tipos de ejes y cargas por eje. Para la variación lateral de los ejes se asume una distribución normal y una desviación estándar.

La diferencia de temperatura equivalente a través de la losa se contabiliza en incrementos de 2°C. Dentro de cada incremento (mes), todos los demás factores que afectan a las respuestas del pavimento y los daños se mantienen constantes.

El daño incremental se acumula mes a mes y se convierte en deterioros del pavimento tales como grietas transversales y ahuellamiento, utilizando modelos calibrados que relacionan el

daño calculado con esfuerzos observables. Se desarrollaron modelos de predicción usando el LTPP (*long term pavement performance*) que es una base de datos a largo plazo que permite predecir el desempeño del pavimento. La Figura 8 muestra la relación entre el daño por fatiga y el agrietamiento en la losa.

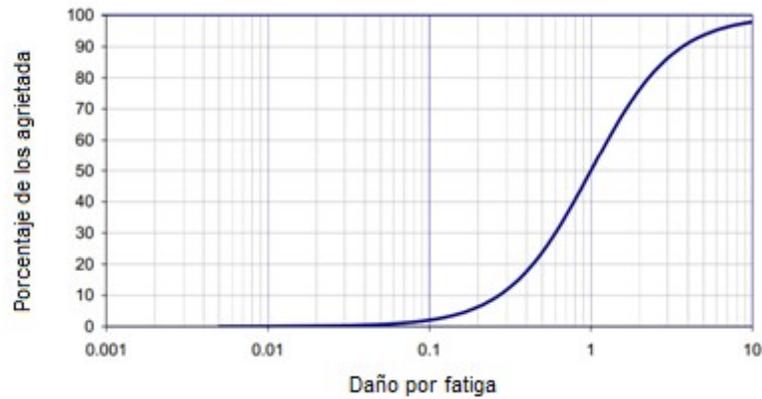


Figura 8. Relación entre el daño por fatiga y el agrietamiento de losa agrietada en JPCP.

Fuente: MPDG, 2004

2.3.3. Confiabilidad del diseño

Existe una gran cantidad de incertidumbre y variabilidad en el diseño y construcción del pavimento, así como en la aplicación de las cargas de tráfico y los factores climáticos sobre la vida de diseño. En el diseño mecanístico-empírico, la predicción de falla es la variable aleatoria de interés en la confiabilidad del diseño. En la guía MEPGD, la variabilidad asociada con cada deterioro predicho es estimada sobre la base de los resultados de calibración, después de un cuidadoso análisis de las diferencias entre los deterioros predichos y los deterioros reales en el campo. Para fines de diseño, se establece la confiabilidad del diseño basado en conocimiento de la variación de un desempeño dado alrededor de una predicción media que se basa en el error estándar de las estimaciones de cada modelo individual.

Después de que una estructura de diseño se ha ensayado para los esfuerzos y para los requisitos funcionales, se convierte en una alternativa de diseño técnicamente factible. En este punto, el pavimento puede ser analizado por sus costos de ciclo de vida y otras consideraciones para la comparación con otros diseños factibles.

2.3.4. Respuestas Críticas en JPCP

La definición de las respuestas críticas está basada en los deterioros que corresponden al agrietamiento transversal desde la superficie de la losa hacia la base de esta (de arriba hacia abajo), el agrietamiento transversal desde la base de la losa hasta la superficie (de abajo hacia arriba), la falla de las juntas transversales y el índice de regularidad internacional (IRI). Estos modelos necesitan como parámetro de entrada tres diferentes respuestas mecánicas, a saber, esfuerzo longitudinal de tensión del punto medio de la losa en su base, el esfuerzo longitudinal de tensión del punto medio de la superficie de la losa y las deflexiones diferenciales de dos losas contiguas. Cada una de estas respuestas mecánicas implica una posición específica de los ejes del vehículo de diseño. (Quirós, 2015).

2.3.4.1. Agrietamiento de abajo hacia arriba

Las diferencias de temperatura en un día caluroso provocan un alargamiento de la parte superior de la losa y una curvatura convexa, sin embargo, cuando los ejes de camiones están cerca del borde longitudinal de la losa, a medio camino entre las juntas transversales, una resistencia a la tensión crítica produce esfuerzos de flexión en la parte inferior de la losa. Las cargas repetidas de ejes pesados bajo esas condiciones resultan en daño por fatiga a lo largo del borde inferior de la losa, que finalmente resulta en una grieta transversal que se propaga a la superficie del pavimento causando deterioro, infiltración de agua, pérdida de capacidad de transferencia de carga en la grieta y aspereza en la losa, lo cual afecta la regularidad superficial del pavimento. (Quirós, 2015). La Figura 9 muestra la respuesta mecánica y las condiciones que maximizan el daño.

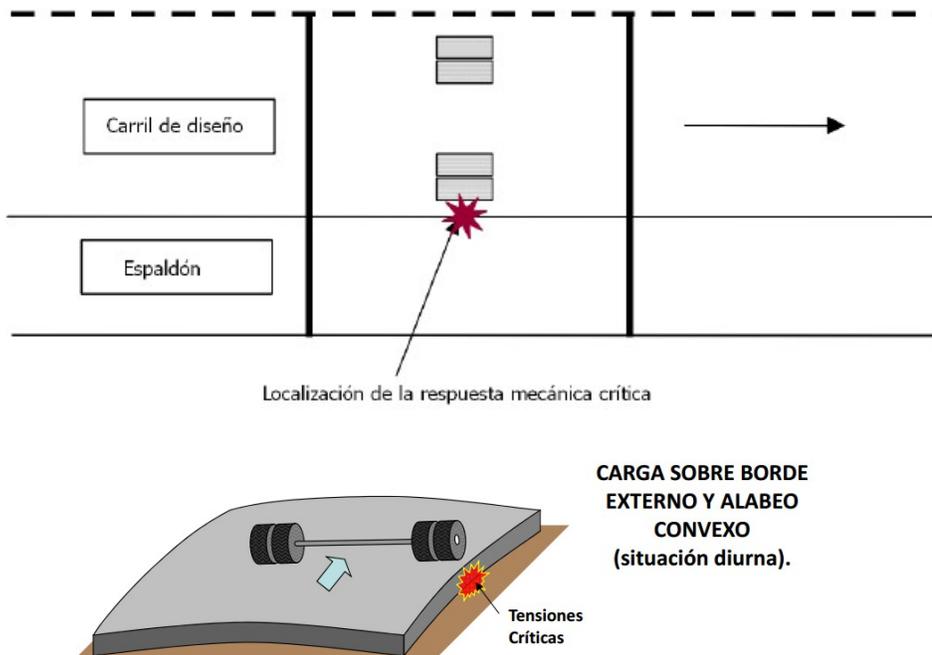


Figura 9. Ubicación de la carga y esfuerzo crítico para agrietamiento de abajo hacia arriba
Fuentes: Quirós, 2015 y Calo, 2012

Lo anterior se puede evitar aumentando el espesor, reduciendo el espaciado, usando una base estabilizada o un concreto con menor coeficiente de expansión térmica.

2.3.4.2. Agrietamiento de arriba hacia abajo

Investigación reciente ha demostrado que las grietas en pavimentos rígidos inician en la superficie del pavimento y se propagan hacia abajo debido a la interacción entre carga de tráfico y efectos ambientales. (Asbahan & Vandebossche, 2011 citado por Quirós, 2015). Durante la noche, la parte superior de la losa es típicamente más fría que la parte inferior. Esto cuando se combina con la carga de los vehículos pesados con ciertas separaciones de eje resulta en daño por fatiga en la parte superior de la losa, que finalmente provoca una grieta transversal o diagonal que se inicia en la superficie del pavimento.

Basados en modelos y mediciones de campo, se determinó que las losas están predominantemente alabeadas hacia arriba durante su vida de servicio, resultando en un potencial agrietamiento de arriba hacia abajo (Asbahan & Vandebossche, 2011, citado por

Quiros, 2015). La Figura 10 muestra la respuesta mecánica y las condiciones que maximizan el daño.

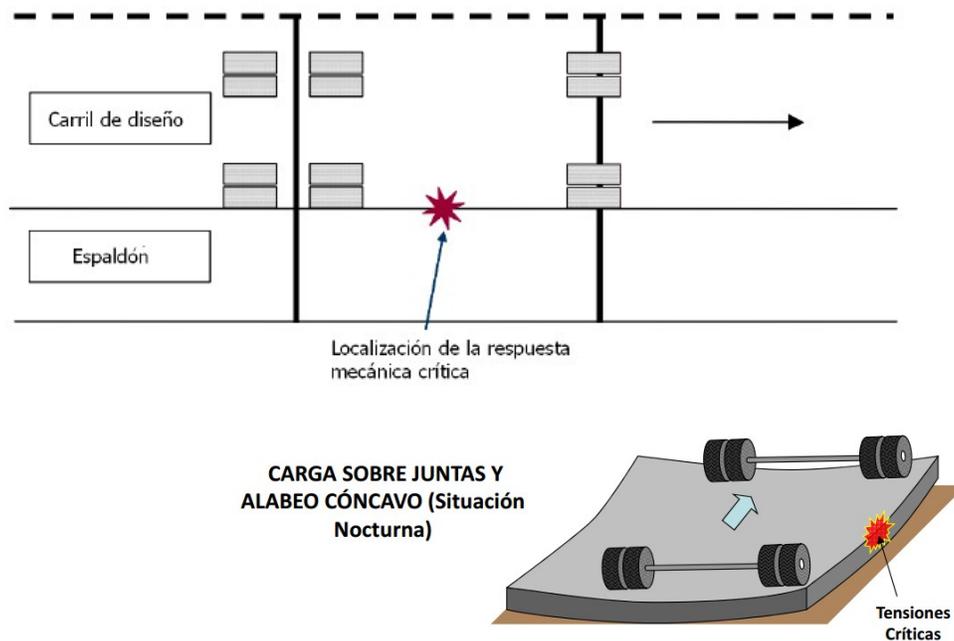


Figura 10. Ubicación de la carga y esfuerzo crítico para agrietamiento de arriba hacia abajo

Fuentes: Quiros, 2015 y Calo, 2012

Esto se controla más eficazmente al proporcionar barras de amarre entre la losa y el espaldón, aumentando la resistencia de la mezcla, reduciendo el coeficiente de expansión térmica y la contracción o usando una base estabilizada.

2.3.4.3. Falla de Junta (Escalonamiento)

Este deterioro está relacionado directamente con la capacidad de transferencia de carga en las juntas transversales. Como respuesta mecánica de interés se tiene la diferencia de deflexiones entre una losa cargada y la losa sin cargar. Es práctica del diseño de pavimentos rígidos utilizar dovelas de acero en las juntas que minimizan esta respuesta mecánica. El diseño determina un diámetro de barra, su separación y su longitud. Existen diseños que no involucran dovelas, en especial pavimentos de losas cortas por lo que se esperaría una mayor susceptibilidad a la falla de juntas en estas estructuras. Además, con el paso del tiempo, la efectividad de las dovelas decae, originando deflexiones mayores y por lo tanto acelerando el deterioro de la estructura. (Quiros, 2015). Este tipo de falla se muestra en la Figura 11.

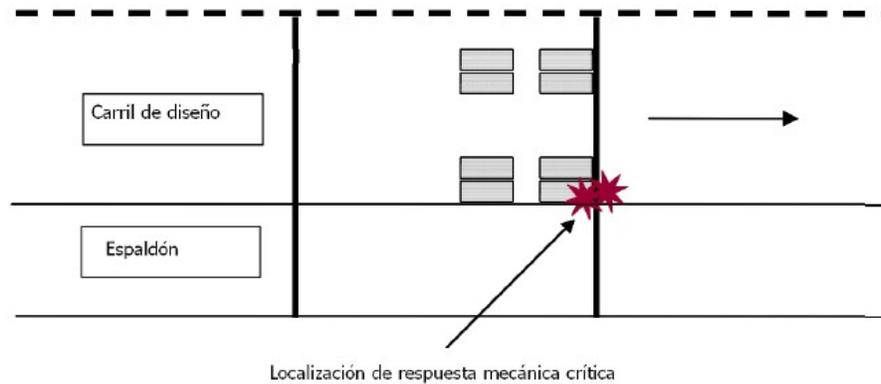


Figura 11. Ubicación de la carga y esfuerzo crítico para falla de juntas

Fuentes: Quirós, 2015.

2.3.4.4. Predicción del IRI

El IRI no es un daño del pavimento sino una medida de la regularidad de la superficie de pavimento, ligado directamente a la calidad del ruedo (Quiros, 2015). El IRI durante el período de diseño depende del perfil del pavimento del cual se calcula el IRI inicial y el IRI final. El modelo usa los esfuerzos predichos a partir de modelos y se estima progresivamente durante todo el período de diseño.

2.3.5. Datos de entrada para el software del diseño de pavimentos rígidos

Los datos de entrada utilizados en la guía MEPDG son:

Información General: Entre la información general se incluye la vida útil del diseño, los meses de construcción, el mes de apertura al tráfico. Además el tipo de pavimento así como el método de evaluación del diseño y los modelos de desempeño aplicables. Se debe identificar la ubicación del proyecto, sus secciones, la dirección del tráfico y los parámetros de análisis como el IRI inicial.

Criterios de desempeño: El diseño en JPCP se basa el agrietamiento transversal, fallas en juntas transversales, y la regularidad del pavimento. El diseñador puede seleccionar todos o algunos de estos indicadores de rendimiento.

El agrietamiento transversal es producto de un diseño inadecuado se traduce en pérdida de la regularidad y falla prematura, por lo tanto, es deseable limitar el agrietamiento transversal para garantizar el desempeño adecuado del pavimento durante el período de diseño. El criterio de rendimiento para el agrietamiento transversal define el porcentaje máximo

permitido de losas agrietadas al final de la vida de diseño y determina el nivel de agrietamiento en la losa que puede ocurrir durante el período de diseño. Los valores típicos de agrietamiento permisible van de un 10 a un 45 por ciento, dependiendo de la clase funcional de la calzada y del diseño de confiabilidad.

Las fallas en las juntas transversales son un factor crítico que afecta la calidad de la conducción. El criterio de desempeño define la cantidad permitida de fallas al final de la vida de diseño. El nivel aceptable de fallas típico es de 0,1 a 0,2 pulg.

Regularidad: Los valores finales del IRI son elegidos por el diseñador. Valores típicamente en el intervalo de 2,4 a 3,9 m/Km se utilizan para el IRI final.

2.3.5.1. Tráfico

La Guía de Diseño MEPDG considera cargas de tráfico de camiones en términos de espectros de carga por eje. Las salidas de software muestran en forma mensual el número acumulado de camiones pesados en el carril de diseño.

Información básica: la información básica incluye el tránsito promedio diario anual de camiones, porcentaje de camiones en la dirección de diseño, factores de crecimiento del tráfico, porcentaje de camiones en el carril de diseño y los factores de distribución por hora y mensuales de camiones, desviación estándar del tráfico lateral, diseño del ancho de carril y el número de tipos de eje por clase de camión y por configuración de eje.

Las entradas generales del tráfico definen la configuración de carga por eje para el cálculo de las respuestas de pavimento. Esta información se utiliza para determinar el número de aplicaciones de carga para el agrietamiento de arriba hacia abajo.

2.3.5.2. Clima

Las condiciones ambientales tienen un efecto significativo. Factores tales como la precipitación, la temperatura, los ciclos de congelación-descongelación, y la profundidad de la capa freática afectan la temperatura del pavimento y de la subrasante; el contenido de humedad, afecta directamente la capacidad de carga y el rendimiento del pavimento.

Las entradas climáticas se combinan con las propiedades del material del pavimento, espesores de capa y los insumos relacionados con drenaje para producir información sobre

los perfiles de temperatura y humedad, temperatura en el momento de esfuerzo cero, índice de congelamiento, media de número anual de días de lluvia, entre otros.

La temperatura es un componente ambiental clave que tiene una influencia directa en el desempeño de los pavimentos. La losa de concreto, al estar expuesta directamente a los rayos del sol y producto de sus propiedades termodinámicas, sufre un calentamiento en la superficie que es transmitido verticalmente mediante procesos de transmisión de energía. Estos procesos generan un perfil de temperaturas en el espesor de la losa. La respuesta mecánica ante esta condición lleva al material a sufrir cambios volumétricos importantes, que junto a las restricciones sobre la losa producto de su propio peso, genera esfuerzos de tensión y compresión en el concreto (Quirós, 2015). Se ha determinado que los esfuerzos longitudinales máximos de tensión alcanzan de un 6% a un 28.5% del módulo de ruptura del concreto (Masad, Taha, & Muhunthan, 1996, citado por Quirós, 2015). La Figura 12 muestra la variación de la temperatura según la profundidad para diferentes horas del día para un día de verano en EE.UU.

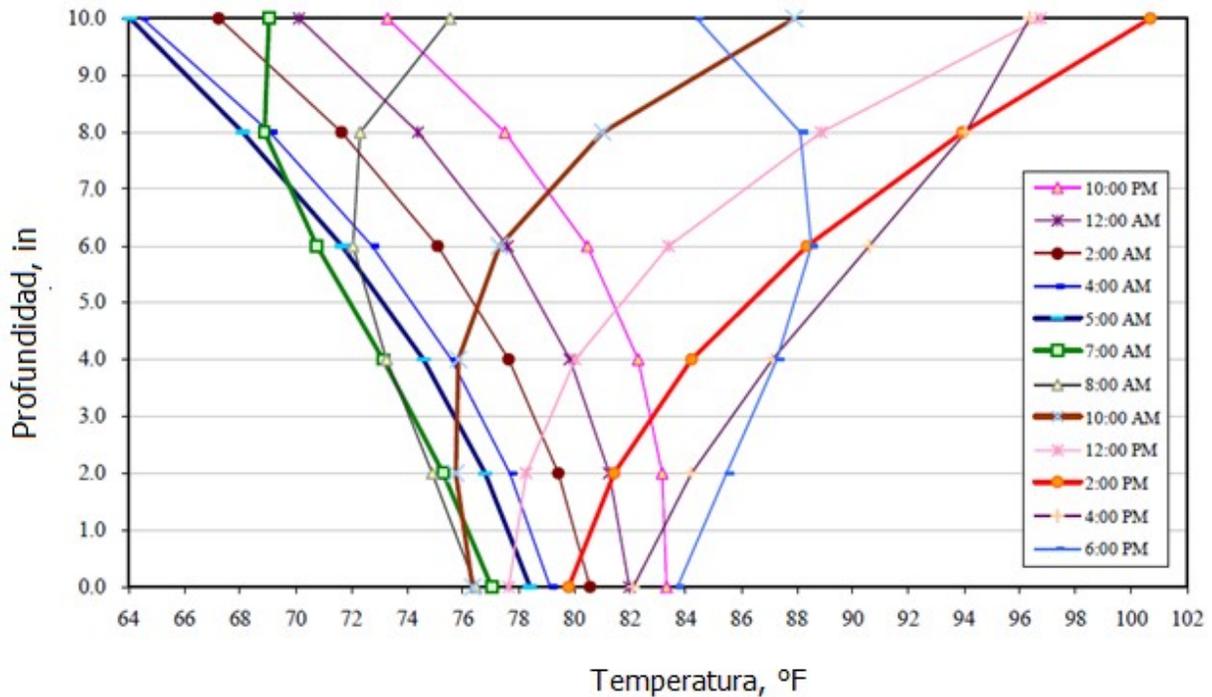


Figura 12. Perfiles de temperatura típicos en una losa de 10 pulgadas de espesor

Fuente: MEPDG, 2004

Los gradientes de humedad provocan un alabeo de la losa hacia arriba, similar al alabeo producto de un diferencial térmico negativo, por lo que el efecto en las respuestas mecánicas (especialmente en esfuerzos de tensión longitudinales en la superficie de la losa), es considerable.

Por su parte la variación estacional de la humedad provoca una deformación permanente en la losa. El alabeo que se produce durante la construcción se combina con la deformación permanente debido a la diferencia de la contracción y se expresa en términos de diferencia de temperatura efectiva. La magnitud del alabeo es un factor sensible que se ve afectado por el clima durante la colocación del concreto, por las propiedades de la mezcla de concreto, el tipo de cemento, la relación agua-cemento y el tipo de agregado.

En Estados Unidos el tema del clima se trata mediante modelos matemáticos que simulan el efecto del clima mediante un software que adquiere información climática de toda una red de estaciones meteorológicas, con solo ingresar las coordenadas geográficas y de altitud.

2.3.5.3. Drenaje y propiedades de la superficie

Incluye información sobre la capacidad de absorción, infiltración y pendiente transversal del pavimento. La infiltración se clasifica en menor, moderada y extrema, ya que depende de la cantidad de precipitación, la condición del pavimento, y el tipo de espaldón.

2.3.5.4. Absorción de onda corta:

Los valores típicos para superficies de concreto son de 0,7 a 0,9.

2.3.5.5. Estructura del Pavimento

El procedimiento de diseño de un pavimento rígido permite una amplia variedad de tipos de concretos, bases, sub-bases y espesores de capa.

Capa de Concreto: se incluyen propiedades generales y térmicas, propiedades de la mezcla, resistencia y rigidez (MR). Además, se incluye la contracción, la temperatura cero esfuerzo, y el deterioro de transferencia de carga, el tipo de cemento, contenido de cemento, la relación agua cemento y el tipo de agregado.

Capa de Base estabilizada con asfalto: Para la construcción de la curva maestra de modulo dinámico (E^*), se necesita el coeficiente de Poisson, la conductividad térmica, la capacidad calorífica y el peso total.

Capas químicamente estabilizadas: Se realiza con cualquier cemento estabilizando capas de base. Se requieren del módulo de elasticidad de la capa y se asume que se mantiene constante.

Base, subbase y subrasante: Los principales insumos requeridos son el espesor, el coeficiente de Poisson y el coeficiente de presión lateral de la tierra.

Conversión de capa módulo resiliente a un módulo de reacción efectivo dinámico de la subrasante:

Las capas de sub-rasante y materiales granulares del pavimento se caracterizan utilizando módulo resiliente. Para el diseño de pavimento rígido, el valor k necesario de la sub-base para el análisis estructural se obtiene a través de un proceso de conversión que transforma la estructura del pavimento actual en una estructura equivalente que consiste en la losa de concreto, base, y un valor k dinámico efectivo, el cual se calcula internamente en el software, para cada mes y se utiliza para calcular esfuerzos críticos y deformaciones en el incremental de daño acumulado.

2.3.6. Consideraciones en el Diseño de Pavimentos JPCP

El diseño de un pavimento JPCP, además de las propiedades de las capas, como se mencionó anteriormente, también conlleva el análisis de distintos factores del diseño, los cuales se citan a continuación:

2.3.6.1. Espaciamiento de las juntas:

Es un factor de diseño crítico que afecta el desempeño estructural y funcional, así como el costo de construcción y mantenimiento. Las tensiones aumentan rápidamente con el aumento de espaciamiento de las juntas, por lo que, debe ser seleccionado en el contexto de las características de diseño. Se recomienda, en general, una separación de junta corta (por ejemplo, 4,5 m); Sin embargo, no hay necesidad de hacer espaciamiento de las juntas de menos de 3,6m.

2.3.6.2. Diámetro de las dovelas y espaciado de dovelas

Cuanto mayor sea el diámetro, menor es la tensión en el concreto. La falla de junta es altamente sensible al diámetro de la dovela. El espaciamiento típico es de 12 in (30,5cm) y un aumento en el espesor de la losa implicaría un aumento del diámetro de la dovela.

2.3.6.3. Tipo de Sellador

Se utiliza en las predicciones de regularidad, pero no se considera directamente como una medida del desempeño.

2.3.6.4. Soporte de borde

Las barras de amarre entre las losas y los espaldones pueden mejorar significativamente el rendimiento reduciendo deflexiones críticas y las tensiones a lo largo del borde. El tipo de espaldón también afecta la cantidad de infiltración de humedad. Estas barras de amarre deben ser proporcionales a la transferencia de carga a largo plazo entre el carril y el espaldón.

2.3.6.5. Ancho de losas.

Una ampliación a lo ancho mejora el desempeño del pavimento ya que se mueve con eficacia la media de la huella de la rueda lejos de los bordes del pavimento donde se producen las cargas críticas mitigando en gran medida la formación de grietas y fallas. El ancho de la losa puede variar de 12 a 14 pies (3,65 - 4,30m). Sin embargo, algunas secciones con losas ensanchadas tienden a desarrollar agrietamiento longitudinal.

2.3.6.6. Erosión de la base

El potencial de erosión de la base o subbase tiene un impacto significativo en la iniciación y propagación de deterioro del pavimento. Los diferentes tipos de base están clasificados de acuerdo a su resistencia a la erosión.

2.3.6.7. Interfaz base y losa de concreto

La contribución estructural de una base estabilizada es importante si la base está completamente unida a la losa, sin embargo, los efectos de la carga ambiental y el tráfico tienden a debilitar este vínculo alrededor de los bordes. El procedimiento de diseño incluye el modelado de los cambios en la condición de enlace de la interfaz con el tiempo, esto se logra mediante la especificación de la edad pavimento en el que se produce la desunión.

2.3.6.8. Espesor de la losa

Esta es crítica desde el punto de vista de rendimiento y costo; ante aumentos de espesor de losa, los esfuerzos de flexión son críticos y las deflexiones disminuyen, con la consiguiente

reducción del agrietamiento y de fallas de junta. El espesor de la losa es el factor más dominante que afecta el desempeño de agrietamiento, debe estar seleccionado de acuerdo al proyecto y al clima correspondiente.

2.3.6.9. Materiales del concreto

El comportamiento del pavimento previsto es válido sólo si los problemas de durabilidad no se desarrollan. Por lo tanto, se deben tomar medidas para asegurar el desempeño adecuado del material, las medidas incluyen componentes de la mezcla, así como proporcionar un drenaje subterráneo.

En general, al aumentar el módulo de elasticidad aumenta la resistencia a la flexión. Un aumento de la fuerza conduce a un menor daño por fatiga; Sin embargo, ya que el módulo de elasticidad también aumenta, los esfuerzos de flexión se incrementarán. Por lo tanto, la reducción de daños por fatiga no es tan dramático como se cree comúnmente cuando se aumenta la resistencia.

El módulo del concreto para diferentes mezclas puede ser muy variable. Así, para un concreto dado, la mezcla con un módulo más bajo proporcionará un desempeño significativamente mejor al agrietamiento. Sin embargo, un menor módulo conduce a mayores deflexiones, que pueden ser perjudiciales para el desempeño.

En cuanto a la resistencia del concreto, entre más alto mejor, pero una mayor resistencia para un material dado se acompaña de mayor módulo, que tiende a moderar el efecto beneficioso. También, si se logra por un mayor contenido de cemento, el aumento de la contracción se traducirá en un mayor alabeo y deformaciones.

2.3.6.10. Transferencia de carga de juntas

La transferencia de carga a través de las juntas transversales es el factor de control de fallas más crítico en diseño JPCP, ya que afecta el agrietamiento de arriba hacia abajo. El uso de dispositivos mecánicos disminuye en gran medida el potencial de falla de junta transversal, el diámetro de doveta es un factor importante y el uso de una base estabilizada también aumenta la eficiencia en la transferencia de carga en la junta. La falla de junta es el factor más crítico en el control de la regularidad.

La profundidad de corte con sierra es importante para asegurar la formación apropiada de las juntas transversales. La práctica convencional ha sido de aserrar juntas transversales a una profundidad de 25 por ciento del espesor de la losa.

2.3.6.11. Transferencia de carga en juntas longitudinales

La transferencia de carga a través de junta longitudinal afecta los esfuerzos de flexión, en consecuencia, afecta el agrietamiento transversal y la falla de junta. Además, el sistema de barra de unión también evita la separación de carril, sin embargo, puede conducir a una mayor infiltración de agua en la estructura del pavimento, así como convertirse en un problema de seguridad. Los estudios demostraron que usar barras número 5 espaciadas a intervalos de 30 in (76,2cm) proporciona un rendimiento adecuado. La profundidad de corte con sierra es importante para asegurar la formación apropiada de las juntas longitudinales. Se recomienda una profundidad de corte con sierra de un tercio del espesor de la losa para juntas longitudinales.

2.3.6.12. Base

Varios tipos base están disponibles para su uso bajo en JPCP, incluyendo la base granular densa (no estabilizada), base estabilizada con cemento, base estabilizada con asfalto, base de concreto pobre, la base de concreto reciclado, y bases permeables. El tipo de base se ha demostrado que afecta la falla de junta, la regularidad y el agrietamiento en la losa.

La contribución estructural de una base estabilizada rígida puede ser muy significativa, sin embargo, el objetivo principal de proporcionar una capa de base es proporcionar un soporte uniforme y resistir la erosión.

La cantidad de estabilizador debe ser cuidadosamente seleccionado para que coincida con la vida de diseño, climáticas, tráfico, y otras condiciones de diseño.

2.3.6.13. Subbase

El uso de una subbase por debajo de la capa de base es importante para minimizar el potencial de erosión y pérdida de apoyo debajo de la base estabilizada. Una subbase también puede ser utilizada como una medida para proteger la base de agregado frente a la contaminación por grano fino.

2.3.6.14. *Drenaje subsuperficial*

Un buen drenaje del subsuelo puede ser importante en la mitigación de grietas. El rendimiento del material a largo plazo es más crítico para los períodos más largos de diseño y el drenaje subterráneo es una característica de diseño que puede mejorar significativamente el rendimiento del material.

2.3.6.15. *Diseño del espaldón*

El diseño del espaldón afecta el desempeño de los costos de construcción y pavimento. Los factores a considerar incluyen el uso del espaldón para el desvío de tráfico, su posible uso como carril adicional durante las horas pico de tráfico. Un espaldón construido monolíticamente es eficaz en la mejora de la capacidad estructural, además, reduce el potencial para el bombeo y la erosión

2.3.6.16. *Mejoramiento de la subrasante*

Proporciona un mayor apoyo y uniformidad a la construcción. Se puede lograr mediante la estabilización de la parte superior o la colocación de una capa granular. Mejorar la subrasante produce un mayor módulo, que afecta a la deflexión de la losa y reduce el potencial de erosión en la parte superior de la subrasante.

2.3.7. Criterios de Desempeño JPCP

La experiencia local puede ser el recurso más valioso en la selección de diseño del pavimento. Una sección de prueba típica incluye ensayos de resistencia de la mezcla de concreto, espesor de la losa y el clima.

2.3.7.1. *Agrietamiento*

Para JPCP cualquier losa dada puede agrietarse ya sea de abajo hacia arriba o de arriba hacia abajo, pero no ambos. Por lo tanto, el agrietamiento combinado debe ser determinado.

2.3.7.2. *Modelo de agrietamiento*

El porcentaje de losas con grietas transversales en un carril de tráfico dado se utiliza como medida de agrietamiento transversal y se predice usando el siguiente modelo de agrietamiento tanto de abajo hacia arriba y de arriba hacia abajo:

$$CRK = \frac{1}{1 + FD^{-1.68}} \quad (8)$$

Donde,

CRK es la cantidad de agrietamiento.

FD = daño por fatiga.

La cantidad total de agrietamiento se determina de la siguiente manera:

$$TCRACK = (CRK_{Bottom-up} + CRK_{Top-down} - CRK_{Bottom-up} * CRK_{Top-down}) * 100\% \quad (9)$$

Donde,

TCRACK = agrietamiento totales (por ciento)

$CRK_{Bottom-up}$ = cantidad predicha de agrietamiento de abajo hacia arriba (fracción)

$CRK_{Top-down}$ = cantidad prevista de agrietamiento de arriba hacia abajo (fracción).

La Figura 13 muestra la relación entre el porcentaje de los agrietada y el daño por fatiga en el modelo de agrietamiento para JPCP.

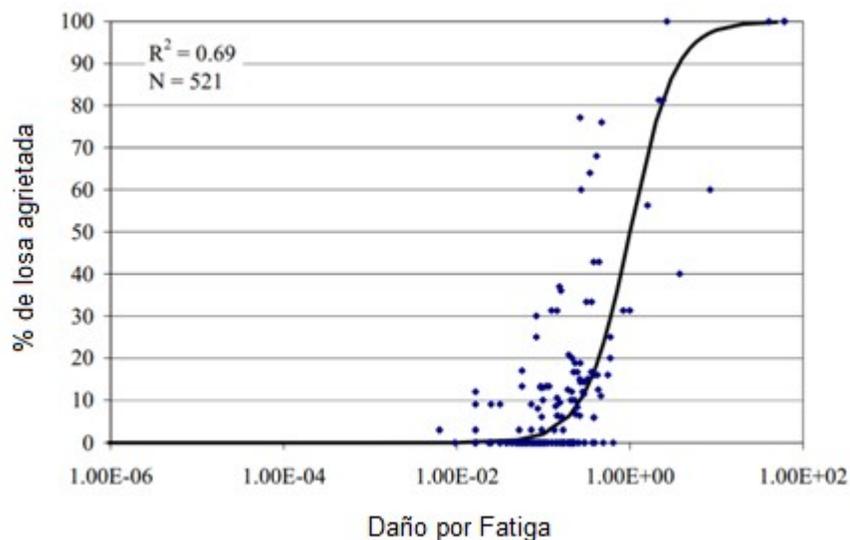


Figura 13. Modelo de agrietamiento JPCP a partir de los datos de campo.

Fuente: MEPDG, 2004

La respuesta estructural se ve afectada por la eficiencia de transferencia de carga, la distribución de temperatura a través del espesor de la losa, la distribución de la humedad a través del espesor de la losa, la magnitud del alabeo, la configuración de la carga, el peso del eje, la presión de los neumáticos, la posición del eje.

Si bien muchos de los parámetros permanecen constantes durante todo el período de diseño, otros varían. En el caso de la edad del pavimento esta provoca cambios en el módulo, resistencia y en la condición entre una base estabilizada y la losa. Las variaciones mensuales

se dan en la rigidez de la base, fundaciones y en la humedad. Además, los gradientes de temperatura afectan el alabeo.

2.3.7.3. Procedimiento Predicción del agrietamiento

El agrietamiento transversal en JPCP tiene un modelo de predicción válido (calibrado en Estados Unidos) si se sigue un procedimiento que incluye tabular los datos de entrada, de tráfico, de la temperatura del pavimento, del proceso mensual de datos de humedad relativa; luego se calcula los esfuerzos correspondiente a cada configuración de la carga y por último se calcula daños por fatiga por cada incremento de daños y suma para determinar el agrietamiento total de abajo hacia arriba y de arriba hacia abajo y se utilizan las ecuaciones supuestas. En el análisis de fatiga se asume una acumulación de daño lineal, la estructura de pavimento se modela como un sistema de dos capas que consta de losa y base con una interfaz, Además se modela la desviación lateral del tráfico con una distribución normal con respecto a la huella. Se asume que el uso del diseño losa ensanchada para cambiar la ubicación crítica de daño por fatiga desde el borde del carril-espaldón hasta el borde de la junta longitudinal-carril-carril. Por lo tanto, los efectos de losas ensanchadas (en términos de agrietamiento por fatiga) son similares a los de pavimentos con espaldones de concreto unido a la losa. Por su parte la relación de Poisson de la base se asume igual a la del concreto al igual que el coeficiente de expansión térmica de la Base, y la distribución de la temperatura a través de la capa de base es constante.

El procedimiento continúa con el cálculo de los esfuerzos para todos los casos que hay que analizar. El número de casos depende del incremento de los daños.

2.3.7.4. Cálculo de los daños por fatiga

Todos los casos producen significativamente diferentes esfuerzos que deben ser evaluados por separado en el análisis de fatiga para obtener resultados precisos. La expresión general para acumulaciones daños por fatiga teniendo en cuenta todos los factores críticos para JPCP agrietamiento transversal es la siguiente:

$$FD = \sum \frac{n_{i,j,k,l,m,n}}{N_{i,j,k,l,m,n}} \quad (10)$$

Dónde,

FD es el daño total fatiga.

i es la edad.

j es mes.

k es tipo de eje.

l es nivel de carga.

m es diferencia de temperatura.

n es ruta de tráfico.

$n_{i,j,k,\dots}$ es el número de aplicaciones de carga aplicado en la condición i, j, k, ...

$N_{i,j,k,\dots}$ es el número permitido de aplicaciones de carga en el estado i, j, k...

El número permitido de aplicaciones de carga es el número de ciclos de carga en el que se espera el fallo por fatiga (50% de agrietamiento) y es una función de la tensión aplicada y la resistencia del concreto. El número permitido de aplicaciones de carga se determina usando el siguiente modelo de la fatiga:

$$\log(N_{i,j,k,l,m,n}) = C_1 \left(\frac{MR_i}{\sigma_{i,j,k,l,m,n}} \right)^{C_2} + 0,4371 \quad (11)$$

Donde se sigue la misma nomenclatura de la ecuación 10 y además:

MR_i es el módulo de ruptura del concreto a la edad i en psi.

$\sigma_{i,j,k,\dots}$ es el esfuerzo aplicado en la condición i, j, k, l, m, n.

C_1 es una constante calibración de valor 2,0.

C_2 es una constante de calibración de valor 1,22.

El cálculo de daños por fatiga es un proceso simple de sumar los daños causados por cada incremento de daño. El daño por fatiga en la ubicación de daño crítico causado por una carga por eje colocado a cualquier distancia aleatoria desde el borde del pavimento (punto j) viene dada por lo siguiente:

$$FD_{ij}^c = P(COV_j) * FD_{ij} \quad (12)$$

donde,

FD_{ij}^* es el daño por fatiga en la localización i (ubicación crítica de daño), debido a la fracción del total de tráfico aplicado que pasa por el punto j.

$P(COV_j)$ es la probabilidad de que el tráfico pase a través del punto j.

FD_{ij} es el daño por fatiga en la localización i , debido a la carga de tráfico que pasa por el punto j .

La probabilidad de cobertura se determina suponiendo una distribución normal.

$$NORMDIST = \frac{1}{SD_{traf} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2} \quad (13)$$

Donde,

NORMDIST es la función de densidad normal de distribución

x es la ubicación de la rueda, es decir la distancia del borde de pavimento hasta el borde exterior de la rueda más exterior, in

μ es la ubicación media de la rueda, in.

SD_{traf} es la desviación estándar, in.

El daño total de la fatiga debido a todo el que tráfico que pasa se obtiene sumando los daños causados por el tráfico que pasa a través de todas las rutas de tráfico. Por tanto, el modelo de agrietamiento JPCP, se utiliza el método de integración de Gauss.

Los esfuerzos calculados para seis puntos de Gauss bajo cada edad, mes, tipo de eje, carga por eje, y la diferencia de temperatura se utilizan para calcular teniendo en cuenta el daño del tráfico bajo cada combinación de condiciones. El proceso se repite para todo el factorial de estos parámetros y el daño calculado para cada condición se suman para determinar el daño total. El mismo procedimiento se utiliza para análisis de agrietamiento de abajo hacia arriba y de arriba hacia abajo.

2.3.7.5. *Confiabilidad*

El diseño de confiabilidad se obtiene mediante la determinación de la predicción de grietas en de la siguiente manera:

$$CRACK_P = CRACK + STD_{CR} * Z_P \quad (14)$$

$$STD_{CR} = -0.00172 CRACK^2 + 0.3447 CRACK + 4,6772 \quad (15)$$

Donde,

CRACK_P es la predicción de grietas en el nivel de confianza P, en por ciento de las losas.

CRACK es la predicción grietas basándose en las aportaciones medidas (correspondiente al 50% de confiabilidad), en por ciento de las losas.

STD_{CR} es la desviación estándar de la configuración en el nivel previsto de agrietamiento.

ZP es la desviación normal estándar (distribución de una cola).

Si el agrietamiento predicho es mayor que los requisitos de diseño, el diseño del ensayo debe ser modificado para aumentar la capacidad estructural.

2.3.8. Falla por junta transversal

La falla por junta transversal es la elevación diferencial a través de la articulación de la media aproximadamente a 1m del borde de la losa.

Las fallas de junta varían significativamente de una articulación a otra, el MEPDG calibró un modelo para este tipo de falla a partir del rendimiento de 248 secciones de campo, el modelo predice la media mediante el uso de un enfoque incremental. Un incremento de las fallas se determina cada mes. La falla se determina como la suma de incrementos de falla de todos los meses anteriores en la vida útil del pavimento.

2.3.9. Modelo de respuesta estructural para Escalonamiento

La carga es crítica cuando se está cerca de la esquina de aproximación independientemente del tipo de eje que se trate. Cuanto más cerca está la carga de la articulación del espaldón del carril longitudinal, mayor será la deflexión en la esquina de la losa. La falla progresa de forma no lineal con el tiempo.

La eficiencia de la transferencia de carga a través de la articulación transversal se modela y varía con el tiempo y en la articulación del espaldón de la línea principal se asume constante. Se requiere un programa de análisis de elemento finito que analice la temperatura y las cargas de la ruedas, además de la separación de la losa y las capas subyacentes y los efectos de la capa de base y la transferencia de carga en sentido transversal y longitudinal. Luego de determinar las respuestas críticas para cada incremento.

2.3.10. Predicción del Desempeño de la Regularidad

El modelo de predicción IRI del MEPDG se basa en el desempeño de campo de 183 secciones de pavimento. La predicción IRI es sencilla una vez que las predicciones de agrietamiento y

fallas se han completado, se predicen las grietas transversales y la falla de junta, entonces se selecciona el IRI inicial y se predice el IRI.

2.3.11. Situaciones de carga especiales

Las entradas de tráfico del software del MEPDG permiten una amplia gama de tipos de camión, neumático, y mezcla de ejes. Sin embargo, la entrada de tráfico también permite al diseñador para llevar a cabo un análisis con un tipo de vehículo especial único. Mediante un análisis de elementos finitos se calcula el esfuerzo de flexión o la deformación crítica y luego se determina el eje simple, tándem, tridem, o eje quad que lo produce.

2.4. Calibraciones laboratorio- campo

El funcionamiento de los modelos de fallas se da cuando la respuesta o el daño calculado es correlacionado con las fallas mediante ecuaciones de calibración. La calidad de las observaciones, las técnicas estadísticas usadas y la adecuación de los modelos matemáticos usados en la calibración afectan el comportamiento en función de transferencia. Prácticamente cualquier aspecto asociado al diseño de pavimentos es variable. En el diseño mecanístico empírico, cada variabilidad puede ser modelada de forma separada o puede ser agrupada y aplicada como un factor de ajuste.

La necesidad de introducir un factor de calibración de la vida útil en las leyes de fatiga obtenidas en laboratorio es un requisito previo a su aplicación, dado que sin este se subestimaría el comportamiento a la fatiga de los pavimentos. En el caso de los pavimentos flexibles, por ejemplo, estos factores andan en el orden de un 10 a un 14 % para una fisuración del 10% y un 45%, respectivamente (Mateos, Perez, Cadavid y Marron, 2011).

Lo anterior se justifica entre otras razones por la distribución transversal aleatoria de las pasadas de los vehículos, el tiempo necesario para que las fisuras iniciadas en el fondo alcancen la superficie y las diferencias geométricas entre los especímenes de laboratorio y el pavimento real.

La guía de diseño MEPDG recomienda preparar un plan de aplicación práctica, seleccionando los procedimientos para la obtención de todos los insumos y el establecimiento de los datos y los valores predeterminados locales, además de capacitación del personal, adquisición de equipo necesario, adquisición de equipo informático necesario y calibración o validación a las condiciones locales. Sin calibración, los resultados de los cálculos mecanicistas no pueden ser

usados para predecir el agrietamiento de losa, fallas de junta, ancho de la grieta o ahuellamiento. Para JPCP el agrietamiento de la losa, y las respuestas de pavimento directos no se puede utilizar directamente para predecir la tasa de desarrollo de la grieta porque se requiere un complejo algoritmo para modelar el mecanismo de agrietamiento que produce "daño". Este daño debe estar correlacionada con el agrietamiento real en el campo. Por último, es importante preparar una base de datos de rendimiento y comparar los resultados del nuevo procedimiento de diseño con el desempeño de estas secciones "locales". Esto requerirá la selección de al menos 20 JPCP.

2.4.1. Caso de Chile

En Chile, un estudio para la Calibración de los Modelos GIMPh, de la Universidad de Chile (UCL) se analizaron tramos de carretera por muchos años y analizaron el avance del agrietamiento, usaron la ley de Miner de acumulación de fatiga y relacionaron el agrietamiento con la fatiga partiendo de la ecuación del modelo calibrado mecanicista.

Usaron zonas testigo de unos 20 km de longitud cuya edad fluctuaba entre los 15 y 24 años elegidos de forma tal que representaran las distintas condiciones de clima, edad, rigidez del apoyo de las losas y sollicitación de tránsito. Se contaba con bases de datos de identificación de diseño del pavimento, de deterioros, de rugosidad, de clima y de volúmenes de tránsito. El procedimiento que siguieron fue el siguiente:

Determinaron los esfuerzos combinados para las distintas condiciones de carga y clima; a partir del nivel de esfuerzos definían el número de repeticiones admisibles, N , con una ley de fatiga, luego determinaban el número de repeticiones de carga para cada condición climática, n y calculaban el consumo acumulado dado por $\sum n/N$.

Consideraron los distintos gradientes en el año mediante información de días despejados, parciales y nublados para cada tipo de estación.

Para evaluar el consumo de fatiga acumulado se consideró que el punto crítico para el daño por fatiga es en la fibra inferior de la losa en el borde longitudinal, en la distancia media entre las juntas transversales. Se combinaron las cargas de tránsito y los diferenciales de temperatura considerando válida la hipótesis de Miner.

Una vez conocido el consumo de fatiga para cada una de las zonas testigo y sus respectivas unidades de muestra, (el que considera las cargas de tránsito, los diferenciales de temperatura, las propiedades de los materiales, la geometría y las condiciones de borde) se

procedió a efectuar una correlación entre esta variable y el porcentaje de losas con agrietamiento transversal encontradas en cada zona testigo. Los resultados obtenidos mostraron que aunque existe cierta dispersión de los datos se observa una tendencia clara entre el consumo de fatiga acumulado y el agrietamiento transversal observado. Antes de un consumo de fatiga acumulado de 1 el agrietamiento es muy cercano a cero, pasado ese punto se observa que el porcentaje de losas agrietadas aumenta relativamente poco, para luego a partir de un consumo de fatiga de 10 crecer rápidamente en la medida que aumenta el consumo de fatiga.

2.4.2. Estudios de la Universidad de Illinois

En la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, en 1998, el profesor Jeffrey Raphael Roesler, estudió el tema de la fatiga en losas y vigas de concreto.

Roesler desarrolló un estudio de laboratorio para determinar si el comportamiento a fatiga de una viga simplemente apoyada es similar al de las losas de concreto completamente apoyadas, dado que en los ensayos tradicionales de vigas, se asume equivalentes aspectos como el tamaño de la muestra, las condiciones de contorno y las configuraciones de carga similares, además, se utilizó una viga completamente apoyada considerándose como un caso intermedio entre las dos anteriores. En cuanto a los resultados de la viga simplemente apoyada, estos fueron similares a los obtenidos a partir de la literatura, los de las vigas completamente apoyadas fueron similares a las vigas simplemente apoyadas. En el caso de las losas completamente apoyadas estas fueron un 30 por ciento mayor (curva SN) que la viga simplemente apoyada, es decir la losa completamente apoyada podía soportar esfuerzos a flexión hasta un 30% mayores que las viga. Además, el módulo de ruptura en el concreto difieren hasta en un 30% dependiendo si la prueba se basa en fallar vigas con respecto a fallar losas, estas diferencias dependen de la geometría de la losa, de las propiedades de los materiales y las condiciones de apoyo y del contorno a la que están sometidas la losa o la viga en las pruebas.

Estudiaron además, los procedimientos mecanistas de diseño de pavimentos de concreto para evaluar el proceso de daño acumulado usado para predecir el agrietamiento por fatiga. El objetivo del trabajo de Roesler era examinar las hipótesis de Miner, junto con diversos modelos de fatiga mediante ensayos acelerados de pavimento (*Accelerated Pavement*

Testing. APT) haciendo uso de un simulador de vehículos pesados (*Heavy Vehicle Simulator, HVS*) sobre losas en campo.

Se usó un concreto de fraguado rápido de cemento hidráulico para permitir el paso del tráfico dentro de las 4 horas de la colocación. El objetivo de las pruebas HVS fue evaluar el desempeño de este concreto bajo el efecto combinado del medio ambiente y la carga de tráfico acelerada. Además, un programa de elemento finito, ISLAB2000, se utilizó para calcular las respuestas de la losa debido a los efectos combinados de tráfico y carga ambiental.

Las relaciones de esfuerzo calculados usadas eran pequeñas y del orden de 0,25 a 0,50 para las losas. Para proporciones baja relaciones de esfuerzos como estos, se espera que la losa llegue a millones de aplicaciones de carga. Sin embargo, la falla se produjo mucho antes de lo esperado, con valores de daño acumulativo significativamente menores que 1,0 (valor al cual, según Miner, el concreto debe fisurarse) por varios órdenes de magnitud.

Lo anterior concluyó que el uso de la hipótesis de Miner para caracterizar el daño por fatiga acumulada en el concreto no logra predecir con exactitud la falla por fatiga de las losas de concreto (Roesler, 2011).

Las diferencias en el número permitido de repeticiones de carga entre los modelos de fatiga presentados resultaron en diferencias significativas en el daño acumulativo calculado. En general, la menor cantidad de daños al agrietamiento fue predicha por el modelo de diseño Cero-mantenimiento, el modelo calibrado de diseño mecanicista y el PCA, en la mayoría de casos en varios órdenes de magnitud. El daño al agrietamiento predicho por el modelo Foxworthy fue mayor.

Otra deficiencia de los modelos es que no consideran el tamaño de la losa de concreto y su geometría, a pesar del hecho de que han demostrado ser un factor significativo en la resistencia a la fatiga del concreto.

Entre las conclusiones de los estudios de Roesler está que en las curvas de fatiga junto con las hipótesis de Miner no dan una explicación a la ruptura por fatiga del concreto ya que se asume que el estado de tensión en el concreto es constante en todo el concreto, por lo tanto no toma en cuenta el daño incremental o la propagación de grietas.

Otra deficiencia presente es que se supone un daño inicial de cero, cuando se tienen zonas débiles inicialmente como resultado de factores tales como la contracción por secado, pobres características de mezcla, la transferencia de carga entre una losa y la losa adyacente o el

espaldón, la fricción losa-base, el peso de la losa y la microfisuración en la superficie de la losa.

En resumen según Roesler se necesita un nuevo método para caracterizar la falla por fatiga que pueda considerar la propagación de la grieta, la secuencia de cargas y la geometría de las losas. Los resultados del análisis de la acumulación de daños mostraron que a pesar de que la ley de Miner da buenos resultados para efectos de predecir el agrietamiento en las losas, no se puede utilizar para predecir la cantidad de repeticiones de carga con cualquier nivel de precisión.

CAPÍTULO III. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES, ENSAYOS ESTÁTICOS, DINÁMICOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se realizaron pruebas con tres diseños de mezcla distintos, cuyos materiales fueron caracterizados previos a los ensayos estáticos y dinámicos. Es importante señalar que la prueba de abrasión de agregado grueso (ASTM C131), no pudo realizarse dado que el equipo disponible en LanammeUCR no estaba en óptimas condiciones.

3.1. Mezcla 1

La mezcla 1 corresponde a la elaborada a partir de materiales de la empresa Holcim. El agregado consiste en arena proveniente de Guápiles de color café y partículas redondeadas (Figura 15), el agregado grueso fue grava 19mm (gravilla) proveniente de Guápiles (Figura 14) y el cemento es MP/AR de uso industrial. Se elaboró un diseño de mezcla a partir de datos obtenidos en laboratorio y de información proporcionada por Holcim, la cual se muestra en los anexos A y B, Los resultados de la caracterización de los agregados y del cemento se muestra a continuación.



Figura 14. Agregado grueso, mezcla 1.



Figura 15. Agregado fino, mezcla 1.

3.1.1. Agregados

En la Figura 16 se muestra la distribución granulométrica de la arena, la cual para tamaños mayores tiende a asemejarse al límite inferior según la especificación ASTM C33. En el caso del agregado grueso al ser este agregado de 19m (gravilla), no se cuenta con una especificación para dicho tipo de agregado, sin embargo, se le realizó la distribución granulométrica, la cual se muestra en la Figura 17, se puede apreciar una preponderancia de tamaños medios, es decir tamaños retenidos en las mallas $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{8}$. La granulometría completa se muestra en el Anexo B.

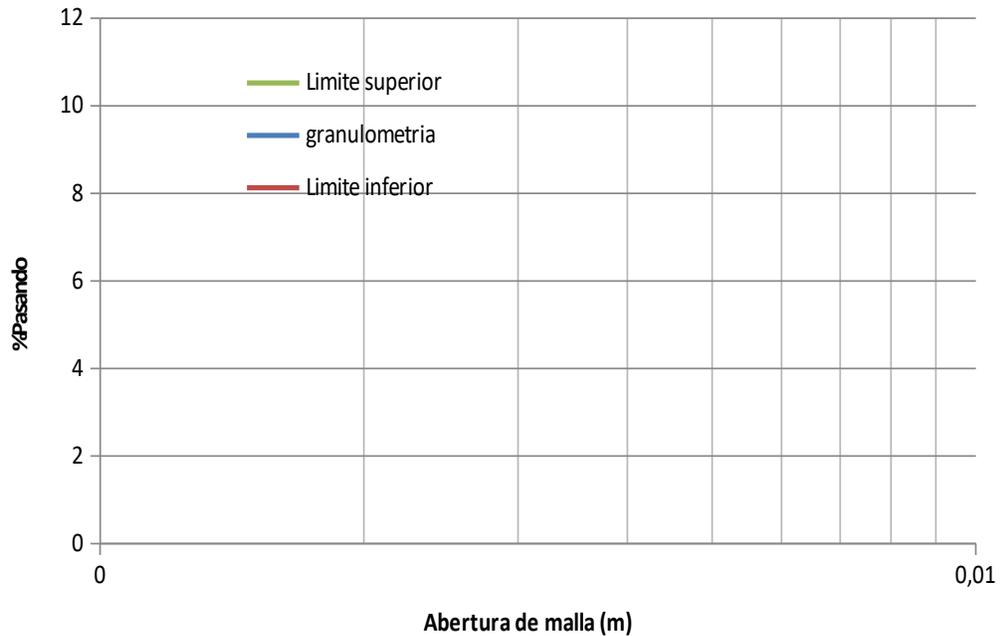


Figura 16. Curva granulométrica del agregado fino (mezcla 1)

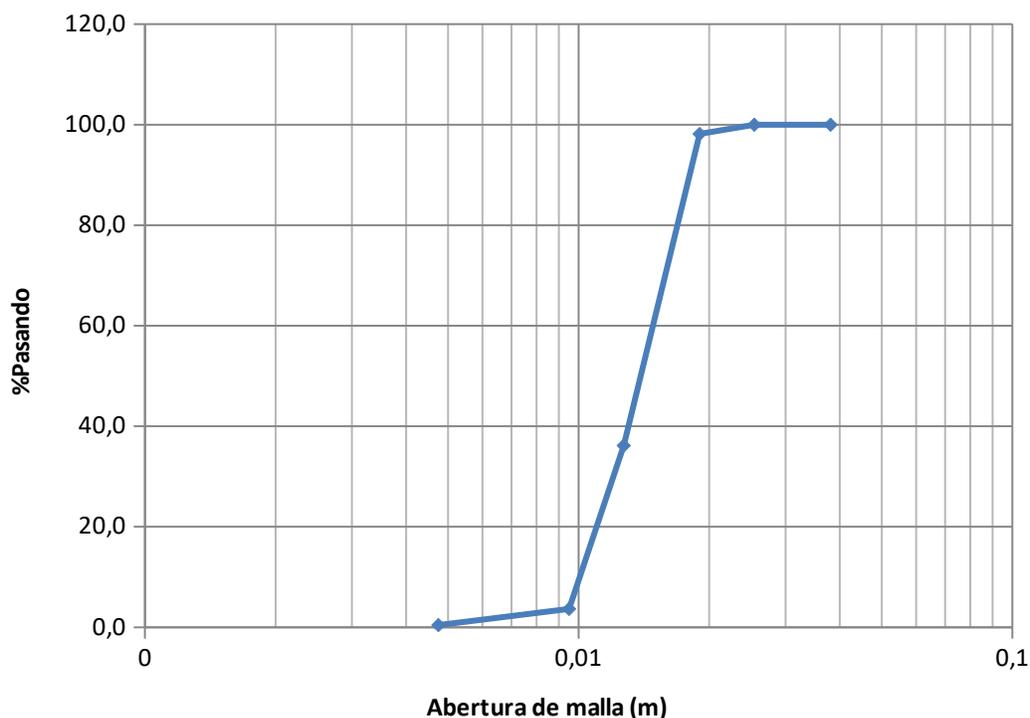


Figura 17. Curva granulométrica del agregado grueso (mezcla 1)

En el cuadro 2 se muestran los pesos unitarios suelto y envarillado para el agregado fino y grueso. Se puede notar como los valores están en el rango esperado de valores comunes para agregados que es entre 1360 y 2000 kg/m³ (Troxell, Davis y Kelly, citado por Navas, 2012).

Cuadro 2. Pesos Unitarios mezcla 1

Propiedad	Agregado Fino (kg/m ³)	Agregado grueso (kg/m ³)
Peso unitario suelto	1428	1364
Peso unitario envarillado	1558	1529

En cuanto a la materia orgánica en el agregado fino, el ensayo respectivo (ASTM C40) arrojó un resultado 2 en la escala correspondiente al plato orgánico (Figura 18), lo cual indica que la presencia de materia orgánica es baja y no es perjudicial. En el Anexo B se muestra además, los resultados de las pruebas de densidad y absorción.

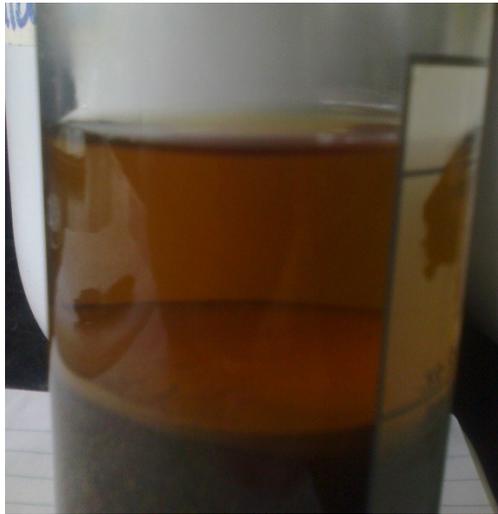


Figura 18. Ensayo materia orgánica en el agregado fino para la mezcla 1.

3.1.2. Cemento

El Cemento Holcim Tipo MP-AR cumple con el Reglamento Técnico de Costa Rica como cemento tipo MP-RTCR/AR 383:2004. Es recomendado para concretos que demanden alta resistencia inicial. Provee un moderado calor de hidratación lo cual favorece la disminución de agrietamiento superficial por contracción plástica. Sus características lo hacen resistentes a la acción de medios agresivos, presencia de sulfatos, cloruros y agua de mar. (Holcim, 2014)

En el Anexo B se muestran los resultados de los ensayos al cemento, donde destaca el hecho de que se obtuvo un tiempo de fragua inicial de 135min y un tiempo de fragua final de 210min, lo cual está dentro del rango aceptable según la norma ASTM C191. Además, el valor de gravedad específica dio 3,1. Por último se tiene que los cubos de mortero a 28 días, mostraron una resistencia a la compresión mayor al mínimo exigido en ASTM C109.

3.1.3. Diseño de mezcla de concreto

Con respecto al diseño de mezcla 1, se adoptó la metodología ACI-211, basado en los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio, El resultado final se muestra a continuación, y el diseño de mezcla completo se muestra en el Anexo C.

Cuadro 3. Diseño de mezcla 1

	Dosificación por peso (kg/m³)
Cemento	544,2
Arena	652,1
Piedra	1017,6
Agua	183,1
Agua/ cemento	0,33

3.1.4. Ensayos estáticos

Se obtuvieron revenimientos de aproximadamente 14cm para esta mezcla, se fallaron dos cilindros y una viga para los resultados a 7 días, y se fallaron 3 cilindros, dos de los cuales se instrumentaron para encontrar el módulo de elasticidad, y 2 vigas para los resultados a 28 días. La Figura 19 muestra uno de los ensayos de módulo de ruptura y la Figura 20 muestra uno de los ensayos de módulo de elasticidad. La Figura 21 muestra la relación entre esfuerzo y deformación en los ensayos de módulo de elasticidad.

Cuadro 4. Ensayos estáticos, mezcla 1

	Resistencia a la Compresión(MPa)	Módulo de Ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidad (MPa)
Resultado a 7 días	30,8	3,5	
	26,9		
Promedio a 7 días	28,9		
Resultado a 28 días	39,6	4,0	22 400
	34,7	4,4	25 200
	40,4		
Promedio a 28 días	38,3	4,2	23 800



Figura 19. Ensayo módulo de ruptura



Figura 20. Ensayo módulo de elasticidad

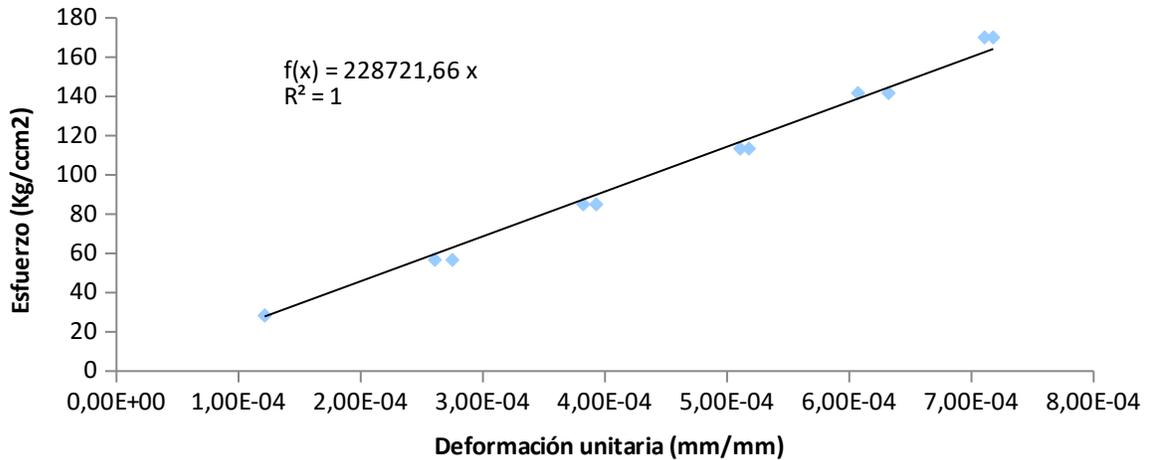


Figura 21. Módulo de Elasticidad mezcla 1

3.1.5. Ensayos dinámicos

Se efectuaron ensayos dinámicos de Módulo dinámico y Resistencia a la fatiga. Se siguió el procedimiento propuesto por Monge, el cual a su vez, se basa en los lineamientos establecidos por Austroads. Los ensayos se realizaron en el LanammeUCR en el equipo MTS810 (*Material Test System*), el cual está asociado al controlador TestStar IIS y al programa *Datos Station Manager*.

Se utilizaron apoyos de carga nuevos, que permitían una menor oscilación del espécimen con respecto a los apoyos anteriormente usados, lo anterior provocó un atraso en las fechas programadas para los ensayos, ya que al realizar el "tunning" con los apoyos y dispositivos de carga anteriores, se decidió esperar a tener disponibles los apoyos nuevos. El montaje de los ensayos se muestra en la Figura 22.

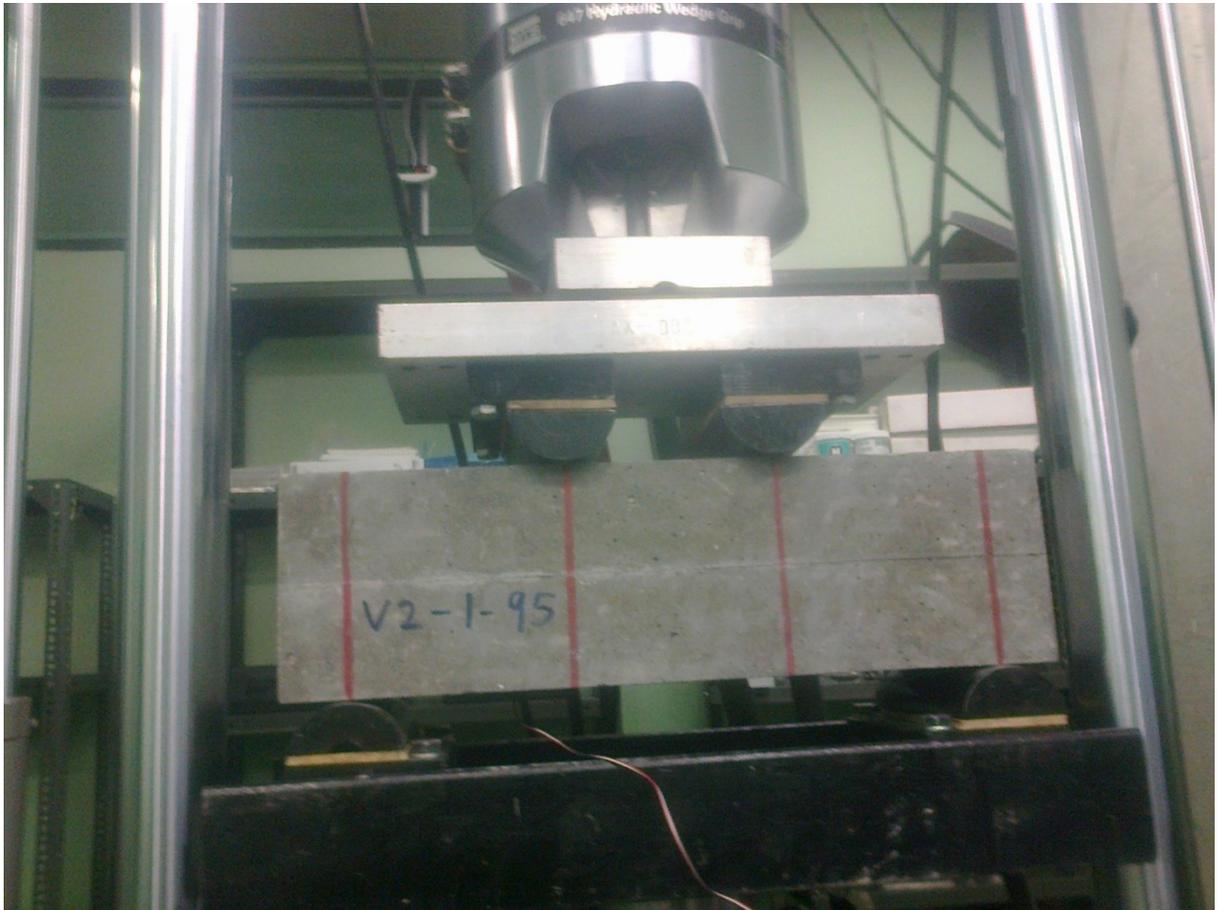


Figura 22. Montaje utilizado en los ensayos dinámicos

El equipo MTS aplicó una carga cíclica mediante un pistón hidráulico, que a través del montaje utilizado sometía a flexión pura al espécimen cargándolo en sus tercios medios, el esfuerzo en la fibra extrema inferior se obtuvo mediante el uso de galgas extensiométricas de 120mm de longitud.

Se consultó a los ingenieros Ing. Ana L Monge y Ing. Francisco Villalobos del LanammeUCR, quienes recomendaron descartar el uso de LVT (Transformador diferencial de Variación Lineal) por el siguiente motivo:

La deflexión del espécimen sigue la siguiente forma, dada la configuración de carga:

$$\Delta = \frac{PL^3}{48EI} \quad (16)$$

Se pretendió estimar la magnitud de esa deflexión, a partir de los datos obtenidos en los ensayos de Monge (2013). Para los datos máximos de fuerza y su correspondiente módulo,

se obtuvo una deformación de 0,0049mm, la cual es inferior a la calibración de LVDT, la cual está calibrada al 0,01mm.

3.1.5.1. Módulo dinámico

Se estimó el módulo dinámico para cada probeta, aplicando 100 repeticiones de carga cíclica haversiana a un 35 % de su capacidad a flexión. Las cargas consistían en pulsos de 250ms y descansos de 750ms. La capacidad a flexión se estimó en condición seca y se muestra en el Cuadro 5. Según Austroads, se sugiere una magnitud de carga de los pulsos no mayor al 40% de la carga máxima de ruptura (Monge, 2015).

Cuadro 5. Carga soportada y módulo de ruptura en condición seca, mezcla 1

Parámetro	Valor	Porcentaje de carga soportada (%)	Carga aplicada (KN)
Módulo de ruptura MPa (psi)	4,23 (614)	35	10,3
Carga Soportada KN	29,3	75	22,0
Esfuerzo asociado MPa (psi)	3,9 (566)	85	24,9
		95	27,8

El hecho de trabajar con un módulo dinámico distinto para cada viga, permitió considerar los efectos de la variabilidad del concreto, en cuanto a las diferencias dadas entre probetas. También se puede notar como la resistencia a flexión en condiciones secas, difiere de los resultados obtenidos con la prueba de módulo de ruptura, la cual se hace en condiciones húmedas, como se muestra en el Cuadro 5, por lo que, al calcular un módulo dinámico para cada viga, se está considerando que no todas se fallaron a una misma edad ni a una misma condición de humedad, sin embargo, las relaciones de esfuerzo si se estimaron iguales para todas las vigas, por lo que en cuanto a la carga, no se está considerando estas variaciones en la capacidad de resistir esfuerzos de flexión entre una viga y otra.

Esto introduce un parámetro que no se consideró en esta investigación, que sería la humedad asociada a cada falla, ya que aunque todas las vigas se mantuvieron en curado por 28 días, no todas se secaban de manera uniforme o al menos no se demostró que así fuera, por lo tanto, no se consideró el proceso de microfisuración del concreto, el cual se da por la retracción por secado y explicaría esa variación entre la resistencia a la flexión obtenida mediante el ensayo de módulo de ruptura y la resistencia a flexión en una viga con un grado de humedad menor.

El documento "Control de la Fisuración en Estructuras de Hormigón (ACI 224R-01)" dedica un capítulo al control de la fisuración debida a la retracción por secado, explica entre otras cosas: "La retracción por secado del hormigón es la disminución de volumen provocada por la pérdida de agua. La retracción por secado se puede definir como la deformación lineal dependiente del tiempo a temperatura constante medida sobre una probeta no cargada que se deja secar. [...] Un valor típico para la deformación final por retracción del hormigón es 600×10^{-6} . Debido a que la capacidad de deformación por tracción puede ser de 150×10^{-6} o menos, habrá fisuración si en un miembro de hormigón la retracción está restringida. Sin embargo, hay un elevado grado de incertidumbre en la predicción de la retracción de las estructuras de hormigón, ya que esta propiedad varía considerablemente en función de muchos parámetros, incluyendo la composición del hormigón, el origen de los agregados, la humedad relativa ambiente, la geometría de la probeta y, más específicamente, la relación entre la superficie expuesta y el volumen del elemento estructural. Además, el lento desarrollo de la retracción en función del tiempo hace que sea difícil obtener una predicción precisa para un hormigón dado a partir de mediciones tomadas a corto plazo en laboratorio". (ACI 224R-01, 2001, p.12).

Se fallaron en total 9 vigas y se obtuvieron los siguientes valores de módulo Dinámico

Cuadro 6. Módulo Dinámico para la mezcla 1.

ID de la Viga	Módulo Dinámico, E* (Mpa)
V1-1-95	23 400
V1-2-95	22 100
V1-3-95	20 900
V1-1-85	24 700
V1-1-75	27 700
V1-2-85	24 500
V1-2-75	23 100
V1-1-65	22 700
V1-2-65	24 300
Promedio	23 700 (3 440 000psi)

Curiosamente para este primer tipo de concreto, el módulo elástico y el módulo dinámico dan valores muy similares (23 800 MPa el E y 23 700 MPa el E*), lo cual no se puede asociar o correlacionar de algún modo dado que ambos ensayos se llevaron a cabo para distintos grados de humedad en los especímenes.

La Figura 23 muestra los resultados de módulo dinámico para una de las vigas, donde se puede apreciar que para un valor pequeño de razón de esfuerzos (35%), efectivamente el concreto se encuentra en su rango elástico por lo que el módulo dinámico se mantiene prácticamente constante en las 100 repeticiones de carga.

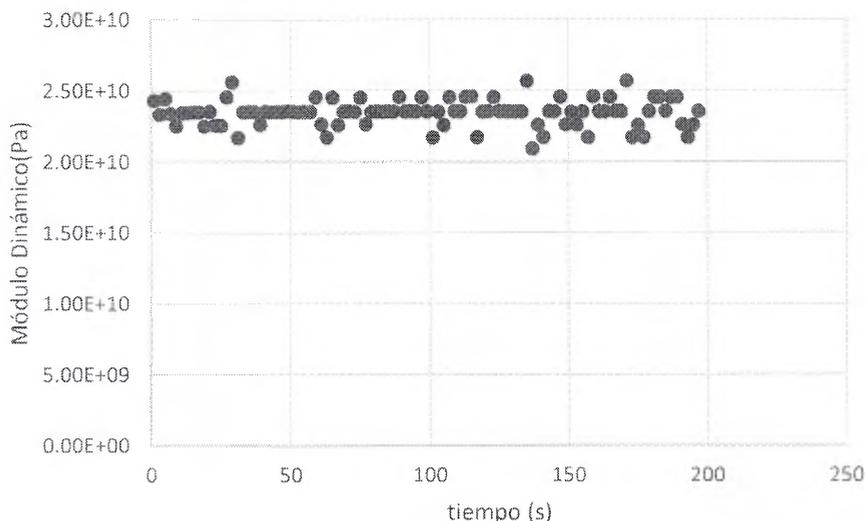


Figura 23. Módulo Dinámico viga V1-1-95

3.1.5.2. Fatiga

El ensayo de fatiga consiste en someter a la viga a carga haversiana, esta vez con pulsos de 250ms de carga y 250ms de descanso. Se aplicó este pulso hasta someter la viga a su fractura total y se definió la falla como el momento en el que el módulo dinámico se reducía a un 50% del valor inicial, definido previamente en el ensayo de módulo dinámico, dada la diferencia de carga y frecuencia entre los ensayos, el módulo inicial en la prueba de fatiga ya presenta una disminución con respecto al obtenido mediante el ensayo de módulo dinámico.

La Figura 24 muestra para una viga que se sometió a una razón de esfuerzos de 75%, como el valor del módulo se reduce con respecto al valor del módulo dinámico inicial, lo anterior muestra como el concreto se va degradando a medida que es sometido a la carga cíclica, lo que hace que tenga menos resistencia a la flexión.

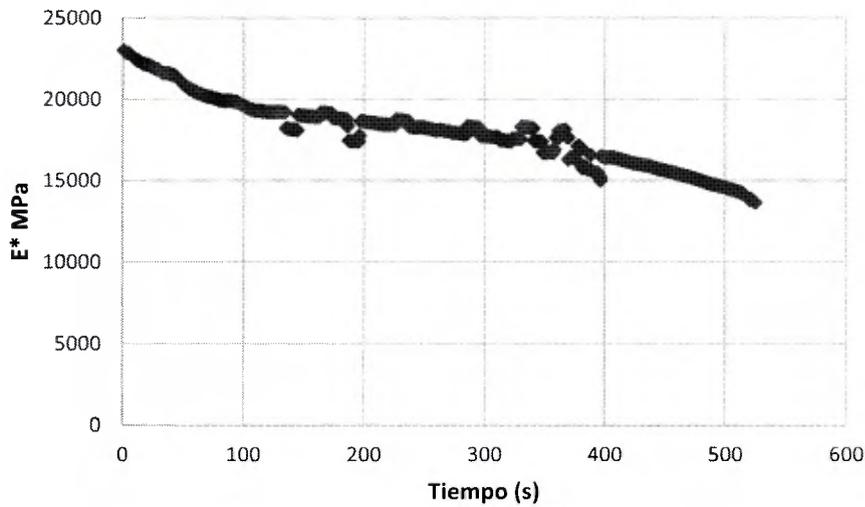


Figura 24. Reducción del Módulo Dinámico en uno de los ensayos de fatiga

El Cuadro 7 muestra los resultados generales de las pruebas a fatiga, los cuales, al ser graficados en la Figura 25 nos da el primer modelo de fatiga, el cual se muestra en la ecuación 17

Cuadro 7. Resultados de los ensayos de fatiga para la mezcla 1

ID de la viga	Relación de esfuerzos	Fuerza (N)	Deformación ϵ (μs)	Ciclos a la falla
V1-1-95	0,95	27 800	407	2
V1-2-95	0,95	27 800	427	3
v1-3-95	0,95	27 800	274	1
V1-1-85	0,85	24 900	394	5
V1-1-75	0,75	22 000	278	1 051
v1-2-85	0,85	24 900	384	2
V1-2-75	0,75	22 000	369	246
V1-1-65	0,65	19 000	336	3 576
V1-2-65	0,65	19 000	107	5 400

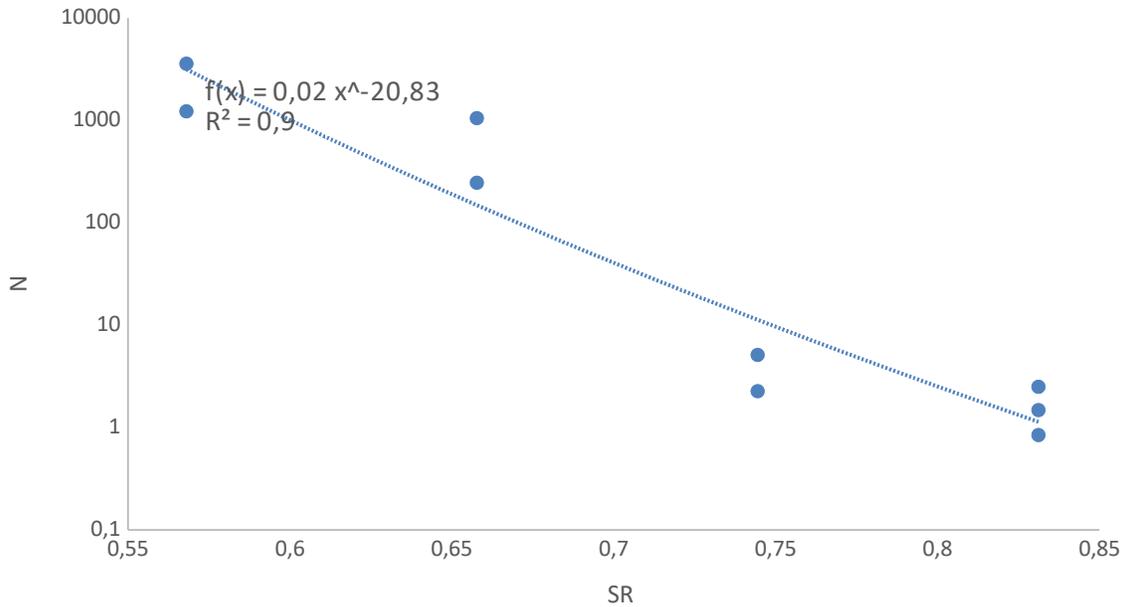


Figura 25. Relación Número de repeticiones contra razón de esfuerzo para la mezcla 1.

El primer modelo de fatiga sería:

$$\log(N) = \log(0,0241) - 20,83 \log(SR) \quad (17)$$

Cabe destacar, que se graficó el modelo anterior con la relación de esfuerzos obtenida a partir de dividir el esfuerzo real aplicado entre el módulo de ruptura de 4,23MPa, por lo que los puntos que se graficaron no corresponden a razones de esfuerzo de 65, 75, 85 o 95%, sino a razones de esfuerzo menores.

3.2. Mezcla 2

La mezcla 2 corresponde a la elaborada a partir de materiales de la empresa Cemex, El agregado consiste en arena proveniente de la planta Puente Piedra de color café y algunas partículas más grades redondeadas (Figura 26), el agregado grueso fue grava combinada también proveniente de Planta Puente Piedra, son partículas angulosas (Figura 27). El cemento es MP/AR uso general. Los resultados de la caracterización de los agregados y del cemento se muestran a continuación.



Figura 26. Agregado fino, mezcla 2.



Figura 27. Agregado grueso, mezcla 2.

3.2.1. Agregados

En la Figura 28 se muestra la distribución granulométrica de la arena, la cual para tamaños mayores tiende a asemejarse al límite inferior según la especificación ASTM C33. Además, se nota una presencia importante de material retenido en la malla número 200, dando resultados por encima de las especificaciones. En el caso del agregado grueso al ser esta grava combinada, se le realizó la distribución granulométrica, la cual se muestra en la Figura 29. Se muestran los límites correspondientes a una piedra cuartilla (25mm), según ASTM C136, por lo que la grava combinada resulta en una distribución granulométrica similar a una piedra cuartilla cercana a su límite superior. La granulometría completa se muestra en el Anexo D.

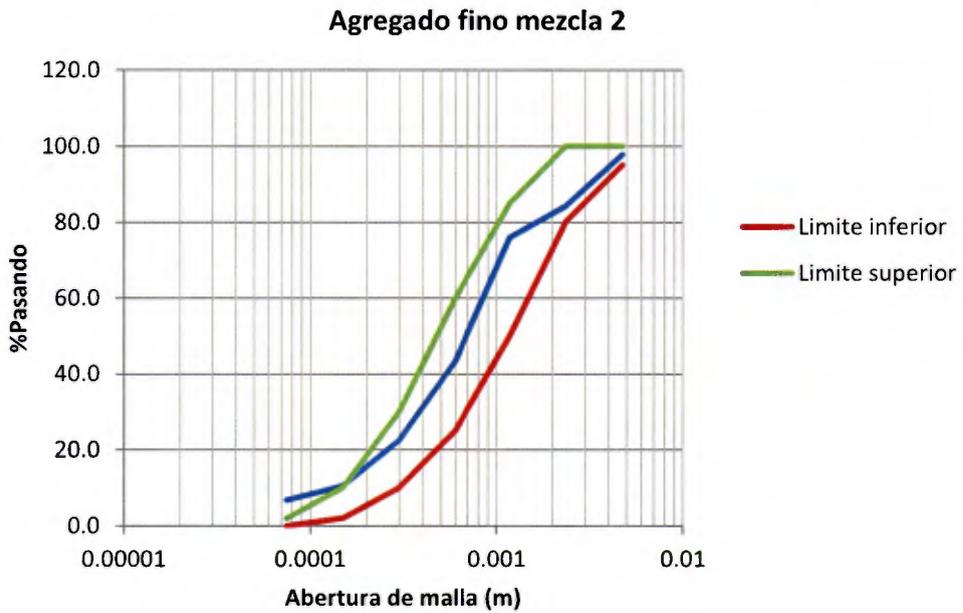


Figura 28. Curva granulométrica del agregado fino (mezcla 2)

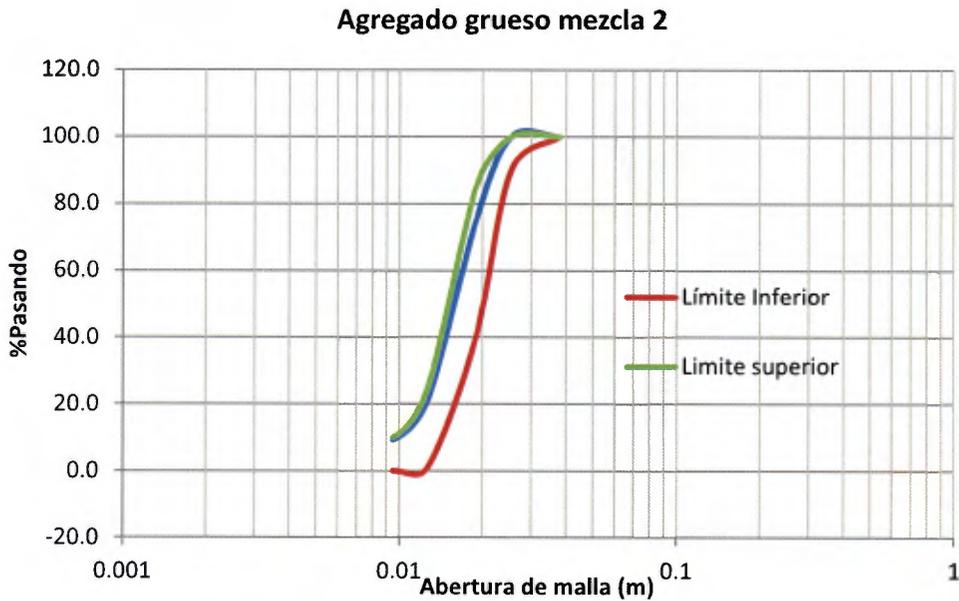


Figura 29. Curva granulométrica del agregado grueso (mezcla 2)

En el cuadro 8 se muestran los pesos unitarios suelto y envarillado para el agregado fino y grueso. Se puede notar como los valores están en el rango esperado de valores comunes para agregados.

Cuadro 8. Pesos Unitarios mezcla 2

Propiedad	Agregado Fino (kg/m³)	Agregado grueso (kg/m³)
Peso unitario suelto	1616	1374
Peso unitario envarillado	1751	1540

En cuanto a la materia orgánica en el agregado fino, el ensayo respectivo (ASTM C40) arrojó un resultado 1 en la escala correspondiente al plato orgánico, lo cual indica que la presencia de materia orgánica es baja y no es perjudicial (Figura 30). En el Anexo D se muestra además, los resultados de las pruebas de densidad y absorción.



Figura 30. Ensayo materia orgánica en el agregado fino para la mezcla 2.

3.2.2. Cemento

Se utilizó cemento Cemex UG proveniente de la planta Patarrá en Desamaparados. El cemento Cemex cumple con el Reglamento Técnico de Costa Rica como cemento tipo UG RTCR 383:2004, es ideal para estructuras que no requieren de alta resistencia inicial. Su bajo calor de hidratación contribuye a reducir considerablemente las fisuras y agrietamientos. Excelente manejabilidad, Resistencia a sulfatos. (Cemex, 2015)

En el Anexo D se muestran los resultados de los ensayos al cemento, se obtuvo un tiempo de fragua inicial de 120min y un tiempo de fragua final de 225min, lo cual está dentro del rango aceptable según la norma ASTM C191. Además, el valor de gravedad específica dio 2,96. Por último, se tiene que los cubos de mortero a 28 días, mostraron una resistencia a la compresión mayor al mínimo exigido en ASTM C109.

3.2.3. Diseño de mezcla de concreto

Se utilizó el siguiente diseño de mezcla, propuesto por los profesionales de la empresa Cemex, el cual se diseñó para un revenimiento de 15cm y para los agregados en condición saturada superficie seca. El diseño se muestra en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Diseño de mezcla 2

	Dosificación por peso (kg/m³)
Cemento	450
Arena	898
Grava Combinada	898
Agua	190
Aditivo redosificación de concreto	4 500ml/m ³

En el Anexo E se muestra la ficha técnica del aditivo para redosificación utilizado.

3.2.4. Ensayos estáticos

Se obtuvieron revenimientos de aproximadamente 12cm para esta mezcla, se fallaron dos cilindros y dos vigas para los resultados a 7 días, y se fallaron 3 cilindros, dos de los cuales se instrumentaron para encontrar el módulo de elasticidad, y 2 vigas para los resultados a 28 días.

Cuadro 10. Ensayos estáticos, mezcla 2

	Resistencia a la Compresión(MPa)	Módulo de Ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidad (MPa)
Resultado a 7 días	34,5	4,4	
	34,3	4,2	
Promedio a 7 días	34,4	4,3	
Resultado a 28 días	50,5	4,3	33 900
	35,2	3,8	29 900
	34,2		
Promedio a 28 días	40,0	4,1	31 900

3.2.5. Ensayos dinámicos

Se siguió el mismo procedimiento utilizado para los ensayos dinámicos de la mezcla 1.

3.2.5.1. Módulo dinámico

El cuadro 11 muestra la resistencia del concreto para las condiciones de humedad correspondientes a los ensayos dinámicos.

Cuadro 11. Carga soportada y módulo de ruptura en condición seca, mezcla 2

Parámetro	Valor	Porcentaje de carga soportada (%)	Carga aplicada (KN)
Módulo de ruptura MPa (psi)	4,1 (588)	35	8,4
Carga Soportada KN	24,0	75	18,0
Esfuerzo asociado MPa (psi)	3,2 (464)	85	20,4
		95	22,8

Se fallaron en total 6 vigas y se obtuvieron los valores de módulo dinámico que se muestran en el cuadro 12. Cabe destacar que originalmente se tenía previsto fallar al menos 9 vigas pero no se logró elaborar esa cantidad de vigas con la cantidad de material disponible, lo cual representó una limitación para este segundo modelo de fatiga.

Cuadro 12. Módulo Dinámico para la mezcla 2

ID de la Viga	Módulo Dinámico, E* (Mpa)
V2-1-90	2 780
v2-2-95	26 700
v2-3-95	20 700
v2-1-85	25 800
v2-1-80	21 500
v2-1-75	25 500
Promedio	20 500 (2 970 000psi)

3.2.5.2. Fatiga

El Cuadro 13 muestra los resultados generales de las pruebas a fatiga, los cuales, al ser graficados en la Figura 31 nos da el segundo modelo de fatiga, el cual se muestra en la ecuación 18.

Cuadro 13. Resultados de los ensayos de fatiga para la mezcla 2.

ID de la viga	Relación de esfuerzos	Fuerza (N)	Deformación ϵ (μs)	Ciclos a la falla
V2-1-95	0,95	21 200	164	506
V2-2-95	0,95	21 200	156	463
V2-3-95	0,95	21 200	379	39
V2-1-85	0,85	20 400	489	2.519
V2-1-80	0,80	19 200	658	1.845
V2-1-75	0,75	18 000	112	65.900

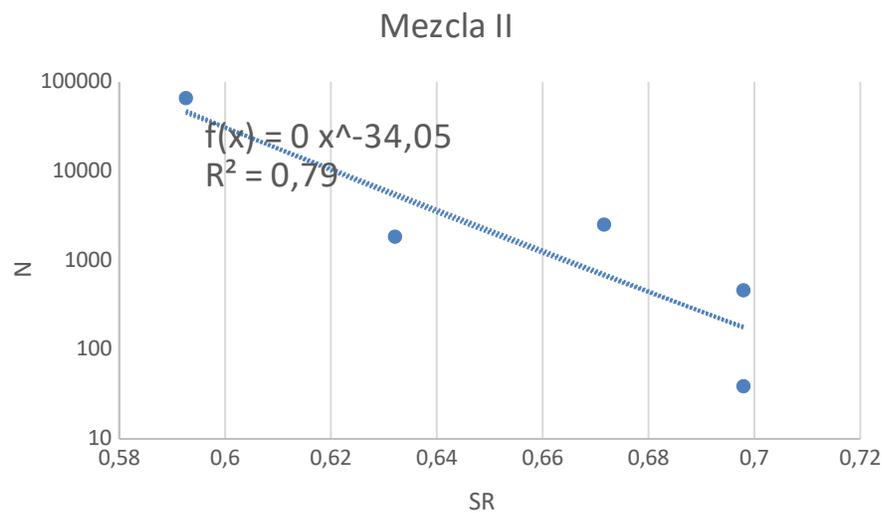


Figura 31. Relación Número de repeticiones contra razón de esfuerzo para la mezcla 2.

El segundo modelo de fatiga sería:

$$\log(N) = \log(0,0009) - 34,05 \log(SR) \quad (18)$$

Nuevamente, se graficó el modelo anterior con las relaciones de esfuerzos obtenidas a partir de dividir el esfuerzo real aplicado entre el módulo de ruptura de 41,3 Kg/cm² (4,05MPa)

3.3. Mezcla 3

La mezcla 3 corresponde a la elaborada a partir de materiales utilizados en la planta La Pacifica, concerniente al proyecto de la Ruta Nacional N°1, sección Cañas-Libera. Se utilizó como

agregado fino arena y polvo piedra (Figura 33), como agregado grueso piedra cuarta y quinta (Figura 32), además se usó cemento Cemex de alto rendimiento también proveniente de dicho proyecto. Se utilizaron aditivos proporcionados por la empresa Sika los cuales son Plastoconcrete 935 y el Sikament 195, cuyas fichas técnicas se adjuntan en los Anexos G y H.



Figura 32. Agregado grueso, mezcla 3.



Figura 33. Agregado fino, mezcla 3.

3.3.1. Agregados

Para la caracterización del agregado fino se realizó una mezcla en proporciones de 60% y 40% de arena y polvo de piedra respectivamente, el cual corresponde a la distribución de diseño del agregado fino. En el caso del agregado grueso, se ensayaron muestras elaboradas a partir de la mezcla de piedra cuarta y piedra quinta en proporciones del 70% y 30%, respectivamente. En la Figura 34 se muestra la distribución granulométrica del agregado fino, la cual según la especificación ASTM C33, presenta para tamaños grandes una cantidad inferior a la que indica la especificación, y como era de esperar dado el uso del polvo de piedra se tiene una cantidad importante de finos que se dan en una proporción mayor de lo que indica la norma. En el caso del agregado grueso al ser una combinación de piedra cuarta y quinta, se tiene una distribución muy uniforme dando una granulometría prácticamente lineal, tal como se muestra en la Figura 35. Los límites que se muestran en este caso corresponden a las especificaciones tipo A CR-2010, para los cuales la granulometría está entre los límites excepto para tamaños grandes, en donde la cantidad de material pasando las malla $\frac{3}{4}$ es cercana al 95%, lo cual representa poca presencia de tamaños grandes. La granulometría completa se muestra en el Anexo F.

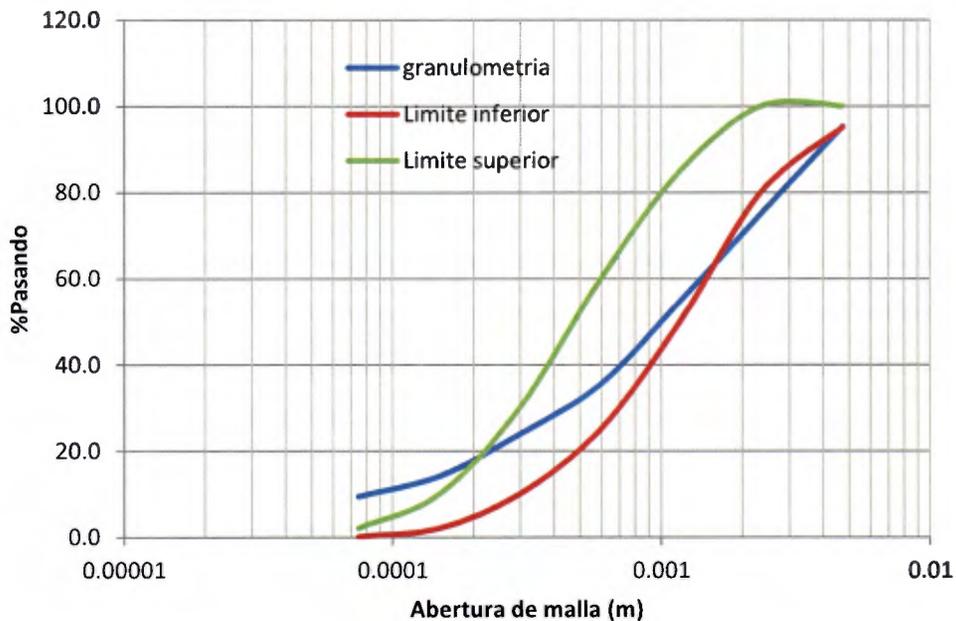


Figura 34. Curva granulométrica del agregado fino (mezcla 3)

Agregado grueso mezcla 3

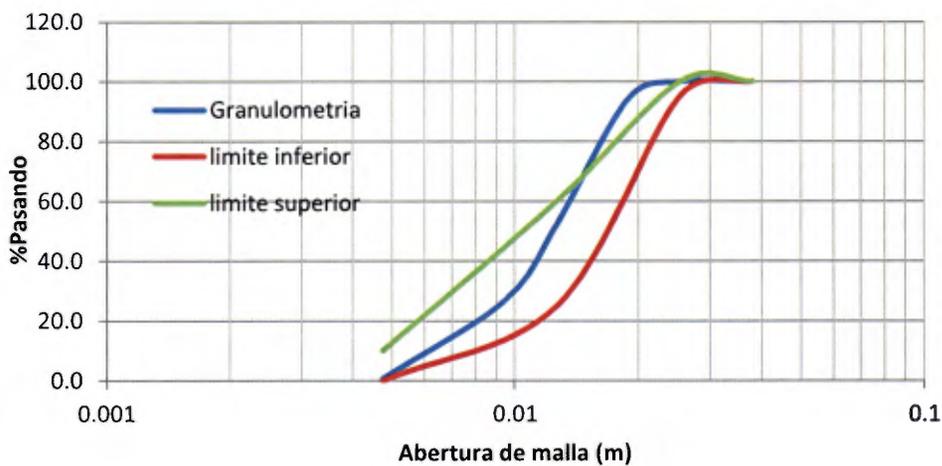


Figura 35. Curva granulométrica del agregado grueso (mezcla 3)

En el cuadro 14 se muestran los pesos unitarios suelto y envarillado para el agregado fino y grueso. Nuevamente, los valores están en el rango esperado.

Cuadro 14. Pesos Unitarios mezcla 3

Propiedad	Agregado Fino (kg/m³)	Agregado grueso (kg/m³)
Peso unitario suelto	1558	1386
Peso unitario envarillado	1708	1535

En cuanto a la materia orgánica en el agregado fino, el ensayo respectivo (ASTM C40) arrojó un resultado 1 en la escala correspondiente al plato orgánico, lo cual indica que la presencia de materia orgánica es baja y no es perjudicial (Figura 36). En el Anexo F se muestra además, los resultados de las pruebas de densidad y absorción.



Figura 36. Ensayo materia orgánica en el agregado fino para la mezcla 3.

En cuanto al cemento se utilizó cemento de la empresa Cemex proveniente del proyecto Cañas- Liberia, análogo al cemento utilizado en la mezcla 2, por lo que no se caracterizó y se asumió en iguales condiciones que el cemento Cemex, proveniente de la planta Cemex de Patarra.

3.3.2. Diseño de mezcla de concreto

Para este tercer diseño de mezcla se trató de imitar el concreto utilizado en el proyecto Cañas Liberia, para lo cual se consultó a los encargados de la planta La Pacífica. Este diseño sufrió variaciones a lo largo del proyecto, por lo que el diseño corresponde al utilizado a fecha de 23 de enero de 2015. El diseño se muestra en el Cuadro 15.

Cuadro 15. Diseño de mezcla 3

	Dosificación por peso (kg/m³)
Cemento	370
Arena	506
Polvo piedra	338
Cuarta	699
Quinta	300
Agua	170
Plastoconcrete	2 590ml/m ³
Sikament	2 220ml/m ³

3.3.3. Ensayos estáticos

Se obtuvieron revenimientos de aproximadamente 5cm para esta mezcla, por lo que se utilizó el vibrador de aguja, se fallaron dos cilindros y dos vigas para los resultados a 7 días, y se fallaron 3 cilindros, dos de los cuales se instrumentaron para encontrar el módulo de elasticidad, y 2 vigas para los resultados a 28 días.

Cuadro 16. Ensayos estáticos, mezcla 3

	Resistencia a la Compresión(MPa)	Módulo de Ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidad (MPa)
Resultado a 7 días	38,6	5,5	
	42,0	5,0	
Promedio a 7 días	40,3	5,3	
Resultado a 28 días	51,1	5,5	24 100
	44,4	5,7	24 700
	53,1		
Promedio a 28 días	49,5	5,6	24 400

3.3.4. Ensayos dinámicos

Se siguió el mismo procedimiento utilizado para los ensayos dinámicos de la mezcla 1

3.3.4.1. Módulo dinámico

El Cuadro 17 muestra la resistencia del concreto para las condiciones de humedad correspondientes a los ensayos dinámicos.

Cuadro 17. Carga soportada y módulo de ruptura en condición seca, mezcla 3

Parámetro	Valor	Porcentaje de carga soportada (%)	Carga aplicada (KN)
Módulo de ruptura MPa (psi)	5,6 (811)	35	10,9
Carga Soportada KN	31,0	65	20,2
Esfuerzo asociado MPa (psi)	4,1 (598)	75	23,2
		85	26,4
		95	29,5

Se fallaron en total 11 vigas y se obtuvieron los siguientes valores de módulo Dinámico, los cuales se muestran en el Cuadro 18

Cuadro 18. Módulo Dinámico para la mezcla 3

ID de la Viga	Módulo Dinámico, E* (Mpa)
V3-1-95	27 600
V3-2-95	29 400
V3-3-95	30 300
V3-1-85	24 800
V3-2-85	24 100
V3-3-85	26 800
V3-1-75	26 700
V3-2-75	27 300
V3-1-65	28 300
V3-4-85	29 500
V3-3-75	31 200
Promedio	27 800 (4 040 000 psi)

3.3.4.2. Fatiga

En el caso de las fallas por fatiga, se descartó la viga V3-3-85 porque dicha viga arrojó resultados incoherentes con respecto a las demás, es decir a pesar de ser una viga fallada al 85% de la resistencia máxima resistió menos ciclos de carga que las vigas de 95%. Lo anterior

se puede deber a la variabilidad del concreto, el cual depende de muchos factores que a pesar de seguirse el procedimiento normado, alguna mínima diferencia puede alterar los resultados, factores como un mal moldeado, posible segregación, tiempo de mezclado, mala corrección de la humedad de los agregados, etc. hace que el concreto no sea idéntico entre diferentes coladas, por lo que dicha viga posiblemente tenía una resistencia a la ruptura menor y por ello resistió muy pocos ciclos de carga. En el caso de las demás vigas, se tiene un comportamiento esperado, por lo que se asume que no presenta al menos en forma considerable, los efectos de la variabilidad del concreto.

El Cuadro 19 muestra los resultados generales de las pruebas a fatiga, los cuales, al ser graficados en la Figura 37 nos da el tercer modelo de fatiga, el cual se muestra en la ecuación 19.

Cuadro 19. Resultados de los ensayos de fatiga para la mezcla 3.

ID de la viga	Relación de esfuerzos	Fuerza (N)	Deformación ϵ (μs)	Ciclos a la falla
V3-1-95	0,95	29 500	342	237
V3-2-95	0,95	29 500	183	3 177
V3-3-95	0,95	29 500	116	153
V3-1-85	0,85	26 400	645	160
V3-2-85	0,85	26 400	297	1 048
V3-1-75	0,75	23 300	299	5 077
V3-2-75	0,75	23 300	262	60 349
V3-1-65	0,65	20 200	262	90 924
V3-4-85	0,85	26 400	276	12 807
V3-3-75	0,75	23 300	119	181 929

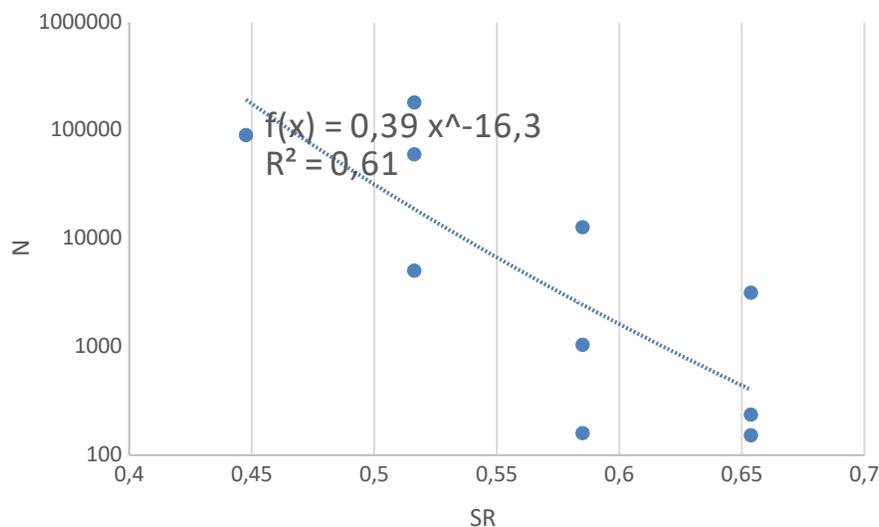


Figura 37. Relación Número de repeticiones contra razón de esfuerzo para la mezcla 3.

El tercer modelo de fatiga sería:

$$\log(N) = \log(0,3938) - 16,3 \log(SR) \quad (19)$$

3.4. Comparación entre mezclas

Se procede a continuación a comparar los resultados de las tres mezclas, el Cuadro 20 resume los resultados mostrados anteriormente.

Cuadro 20. Comparación entre mezclas

Mezcla	Resistencia a la Compresión (MPa)	Módulo de Ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidad (MPa)	Módulo Dinámico (MPa)	Ecuación de fatiga Log(N)=
1	38,3	4,2	23 800	23 700	$\log(0,0241) - 20,83$
2	40,0	4,1	31 900	20 500	$\log(0,0009) - 34,05$
3	49,5	5,6	24 400	27800	$\log(0,3938) - 16,31$

Las mezclas presentan valores de módulo de ruptura aceptables para pavimentos rígidos, siendo mayor la correspondiente a la mezcla tres con 57,0 kg/cm² (5,6MPa) y menor la correspondiente a la mezcla dos con 41,3 kg/cm² (4,1 MPa), muy cercana a la mezcla uno con un MR de 43,2 kg/cm² (4,2 MPa). En el caso de la resistencia a la compresión, la mezcla uno

tiene un $f'c$ de 390 kg/cm^2 ($38,3\text{MPa}$), la mezcla dos de $407,7 \text{ kg/cm}^2$ ($40,0\text{MPa}$) y la mezcla tres $504,0 \text{ kg/cm}^2$ ($49,5\text{MPa}$). En esta investigación los valores de módulo de ruptura son entre un 10 y un 11% del valor de la resistencia a la compresión.

Tal como era de esperarse, los concretos con mayor resistencia son los que al aplicar los modelos de fatiga obtenidos arrojan más número de repeticiones de carga, siendo el modelo 3 el que presenta esta condición seguido por el modelo 2 y por último el modelo 1. Lo anterior muestra como la mezcla 3 correspondiente a un proyecto real (Cañas Liberia) arrojó un resultado aun mayor al indicado en el cartel del licitación del proyecto el cual solicitaba una losa de concreto de 50Kg/cm^2 ($4,9\text{MPa}$) de Módulo de Ruptura.

Se notó además con la experimentación en el laboratorio, que el concreto tipo uno, era menos trabajable que los otros dos concretos, lo cual lo podemos asociar al hecho de no utilizar ningún tipo de aditivo en esta mezcla. Se considera que para futuras investigaciones se debe siempre incluir el uso de aditivos ya que es la práctica usual en los concretos para losas de pavimentos, entre otros motivos porque estos concretos presentan usualmente resistencias mayores que los concretos de uso convencional.

3.5. Ecuación de fatiga genérica

Se desarrolló una ecuación de fatiga genérica, la cual incluye los resultados de todos los ensayos independientemente del tipo de mezcla, además, se incluyeron los ensayos de fatiga elaborados por Monge (2013), los cuales para una razón de esfuerzos de 95% dieron 28 repeticiones de carga, para una razón de esfuerzos de 85% dieron 150 repeticiones de carga y para una razón de esfuerzos de 75% dieron 9 212 repeticiones de carga.

Los resultados se muestran en la figura 38 y en la ecuación 20, cabe destacar que el valor R^2 de la regresión dio menor a los valores de R^2 obtenidos en los casos de los modelos 1 y 2, sin embargo dio un valor similar al del modelo 3, lo anterior muestra cómo se necesitan realizar más ensayos de fatiga para calibrar estos modelos y descartar los resultados que se alejen de la tendencia que muestre la mayoría.

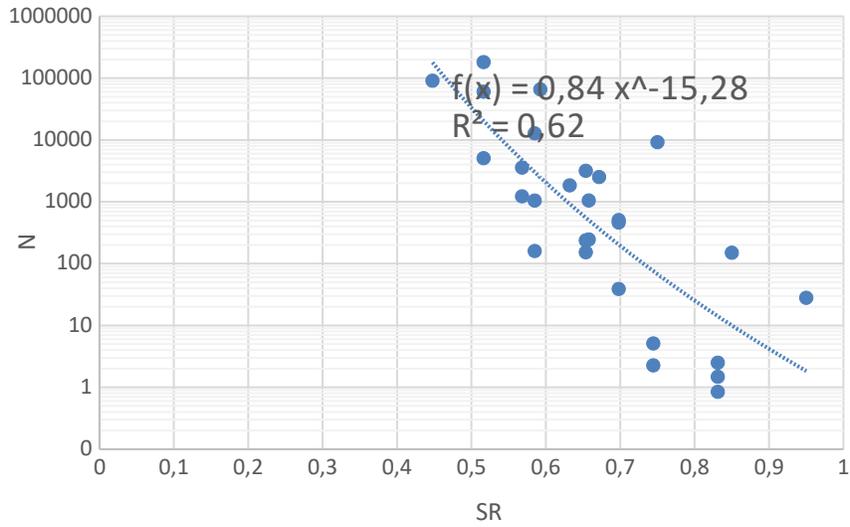


Figura 38. Modelo de fatiga genérico.

El modelo de fatiga seria:

$$\log(N) = \log(0,836) - 15,3 \log(SR) \quad (20)$$

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS MECANICISTA

Las metodologías mecanicistas pretenden tener un enfoque puramente científico, con un marco teórico suficiente que permita el análisis completo de la mecánica del comportamiento de un pavimento ante las acciones del clima y del tránsito vehicular. Esto es, un marco teórico en donde las propiedades fundamentales de los materiales se conocen, y se pueden determinar en laboratorio o en campo. (Garnia y Correa, 2004).

Para el modelado de la estructura de pavimento se utilizó el software ISLAB2000, un programa de elemento finito bidimensional desarrollado por *Applied Research Associates* (ARA), Inc. con el soporte del Departamento de Transporte de Minnesota. ISLAB2000 es la versión más reciente del programa ILLI-SLAB, desarrollado en 1977 en la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign y es el principal modelo estructural para la generación de respuestas mecánicas en el software MEPDG (Khazanovich, y otros, 2000 citado por Quirós, 2015).

El análisis de elemento finito ha probado que es una herramienta confiable a la hora de resolver problemas de ingeniería incluyendo las respuestas de los pavimentos de concreto como el cálculo de esfuerzos y deflexiones bajo la influencia de las cargas del tránsito y factores climáticos (Vega, 2012).

Además del software ISLAB200, se utilizó el software Ap-RIGID1.0, desarrollado por el LanammeUCR, el cual analiza los pavimentos rígidos bajo dos métodos, uno es una red neural artificial y el otro es mediante una regresión lineal múltiple.

4.1. Estructura de pavimento rígido

Para el diseño de la estructura de pavimento se consultó la información del proyecto *Cañas-Liberia*, y se siguió la estructura utilizada en el área de ampliación de dicho proyecto la cual se muestra en la Figura 39. Se compone de una losa de concreto de 25cm de espesor, una base estabilizada BE-35 de 20cm de espesor, una subbase de 20 cm y una capa de material de préstamo de 20cm.

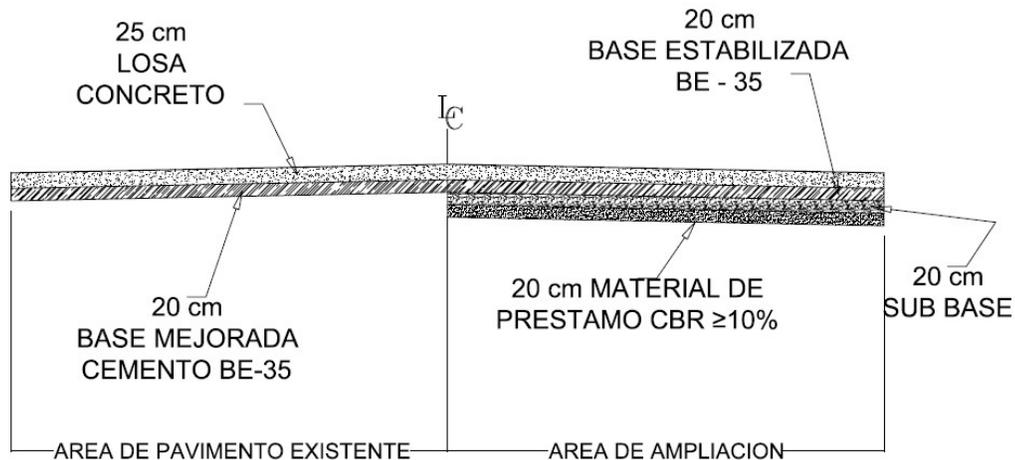


Figura 39. Pavimento Rígido Sección: Cañas-Liberia

Fuente: MOPT-CONAVI, 2011

Para la modelación de los pavimentos con losas de concreto de la mezcla 1 y mezcla 2, se utilizó la misma estructura pero se revisó el espesor de la losa con el método AASTHO 93. Para ello se utilizaron los valores de Módulo de Elasticidad y Módulo de Ruptura determinados experimentalmente, así como los parámetros facilitados la empresa FCC Construcción, los cuales fueron utilizados en el diseño del pavimento del proyecto Cañas-Liberia. Los valores utilizados en la metodología AASTHO 93 se muestran en el Cuadro 21:

Cuadro 21. Diseño de pavimento de concreto para la mezcla 1 y 2

Parámetro	Valor
Área bajo la curva de distribución, Z_R	-1,282
Coeficiente de drenaje, J	2,7
Serviciabilidad final, p_t	2,5
Módulo de reacción de la subrasante, K. MPa/m(pci)	48,6 (180)
Desviación estándar S_o	0,35
Coeficiente de drenaje, C_d	1,1
Pérdida de Servicios, ΔPSI	2,0
Ejes Simples equivalentes, ESAL	42 639 039
Módulo de Elasticidad, mezcla 1. MPa (psi)	23 800 (3,4x10 ⁶)
Módulo de Ruptura, mezcla 1 MPa (psi)	4,2 (614)
Módulo de Elasticidad, mezcla2. MPa (psi)	31 900 (4,6x10 ⁶)
Módulo de Ruptura, mezcla 2. MPa (psi)	4,1 (587,9)

Fuente: FCC Construcción, 2016

Los resultados arrojaron un espesor de losa de 25,0cm para la mezcla 1 y de 26,2 cm para la mezcla 2. Para efectos prácticos se modelaron ambos casos con losas de 25cm de espesor.

4.2. Modelado en el software ISLAB2000

Para el modelado en ISLAB2000 se consideraron dos condiciones simultáneamente, un gradiente de temperatura y el efecto de un camión de diseño. Sin embargo, el software pide además las propiedades de los materiales y la configuración geométrica del pavimento.

4.2.1. Propiedades de los materiales.

Se incluyeron los resultados obtenidos por el LanammeUCR en un análisis de evidencias llevado a cabo en el proyecto Cañas-Liberia el 24 de febrero de 2015, en este análisis realizó el ensayo de deflectometría de impacto (FWD) en 10 tramos del proyecto, el cual incluía losas sanas las cuales no presentaban agrietamiento, losas agrietadas y losas reparadas con inyección de epóxico. Basado en los ensayos de FWD y el procedimiento de retrocálculo de módulos, llegaron a los resultados para las distintas capas que se muestran en el Cuadro 22.

Cuadro 22. Modulo elástico para las distintas capas del pavimento

Capa	Módulo (psi)	Módulo (MPa)
Losa de Concreto	4 799 300	33 090
Base Estabilizada BE-35	650 000	4 480
Subbase	15 000	103
Material de préstamo	4 800	33

Fuente: Unidad de Auditoria Técnica Externa, LanammeUCR, 2015

Cabe destacar que en cuanto al valor del módulo de elasticidad utilizado en el modelado del pavimento para la mezcla 1 y 2, se utilizó el resultado obtenido experimentalmente, sin embargo para la mezcla 3 se prefirió utilizar el obtenido mediante retrocálculo de módulo que se muestra en el Cuadro 22. Este valor es superior al encontrado experimentalmente, el cual fue de $3,53 \times 10^6$ psi, lo cual demuestra como existen diferencias entre el concreto real utilizado en el proyecto Cañas-Liberia y el concreto de la mezcla 3 que trataba de imitar a este primero, esto debido a lo difícil que es reproducir el concreto original en laboratorio a

pesar de utilizar el mismo diseño, entre otros motivos, por la diferencia en el procedimiento de mezclado y moldeado de especímenes en laboratorio contra el mezclado en planta y colocación de concreto con maquinaria especializada en campo.

Además, se utilizaron valores típicos del concreto como una razón de Poisson de 0,15, un coeficiente de expansión térmica de $5,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$ y un peso unitario de $0,087 \text{ kip}/\text{ft}^3$. En cuanto a las otras capas se usó un peso unitario de $1100 \text{ kg}/\text{m}^3$ ($0,068 \text{ kip}/\text{ft}^3$). Finalmente se usó una razón de Poisson de 0,15 para la base estabilizada, 0,35 para la subbase y de 0,4 para el material de préstamo. Todos estos valores según lo recomendado como valores típicos para los materiales en Costa Rica (Porrás, 2009 citado por Monge, 2013).

4.2.2. Camión de Diseño

El camión de diseño utilizado es el T3-S2, dado que es el vehículo con mayor relación entre las cargas y el número de llantas, siendo 18 en total. A este camión le corresponde un eje sencillo de dirección, un eje tándem doble de tracción y un eje tándem doble en un remolque. La configuración geométrica del T3-S2 se muestra en la Figura 40.

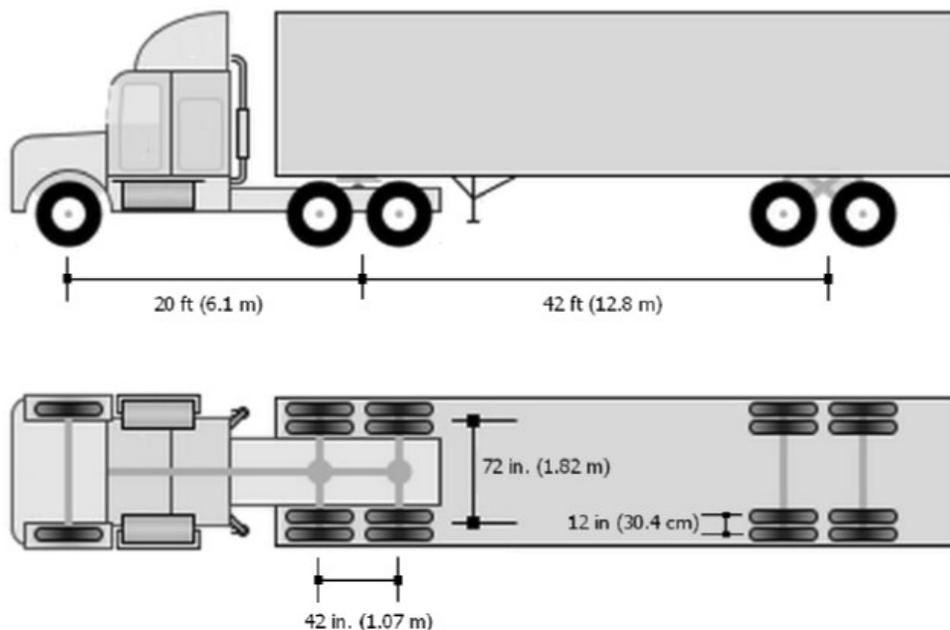


Figura 40. Configuración geometría del vehículo T3-S2.

Fuente: Quirós, 2015.

El camión T3-S2 está autorizado a cargar 39 toneladas distribuidas de manera tal que el eje direccional soporte 6 toneladas y los ejes tándem 16,5 toneladas cada uno, estos valores fueron utilizados en la modelación en ISLAB2000. En cuanto a las dimensiones de los ejes en el sentido transversal, se utilizaron las que se muestran en la Figura 41. Además, se utilizó una presión de llantas de 120 psi, la cual es recomendada por la guía MEPDG.

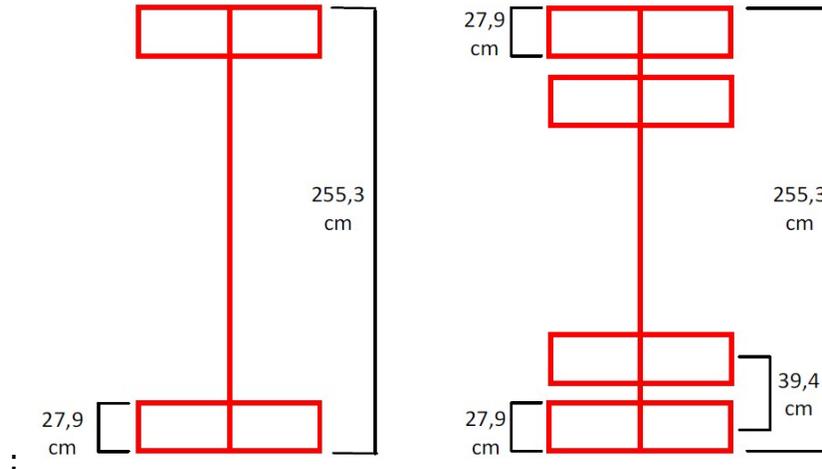


Figura 41. Dimensiones de los ejes simple y dual en el sentido transversal

Fuente: Monge, 2013

Para el análisis de elemento finito con el ISLAB2000 se diseñó una configuración de 7 losas de 3,65m de ancho por 4,15 m de largo (análogas a las del proyecto Cañas-Liberia). Se modelaron las losas del carril adyacente así como el espaldón de 1,8m de ancho (igualmente análogo al utilizado en Cañas-Liberia), de esta manera se logra simular mejor la transferencia de esfuerzos que se da entre las losas.

Al programa se le debía ingresar el valor de transferencia de carga (LTE), para la transferencia en el sentido transversal se utilizó un 50% según la recomendación de la guía MEPDG para interacción losa-losa cuando hay dovelas (Monge, 2013). Para la transferencia en el sentido longitudinal, se obtuvo basándose en los análisis de LTE a partir de los ensayos de FWD llevado a cabo en el proyecto Cañas-Liberia, por parte del LanammeUCR. Como se citó anteriormente se analizaron 10 tramos del proyecto y de cada tramo se obtuvo la transferencia de carga promedio. En el caso de la Modelación en ISLAB200, se usó un valor de LTE de 90%, el cual corresponde al promedio de todos los tramos. Los resultados de LTE obtenidos por el LanammeUCR se muestran en el Cuadro 23.

Cuadro 23. Eficiencia de transferencia de carga para los tramos analizados por LanammeUCR

Tramo	Promedio	Desviación estándar	Cantidad de datos
Tramo A	85,5	11,9	32,0
Tramo B	97,4	4,4	19,0
Tramo C	90,8	11,0	221,0
Tramo D	94,1	8,5	42,0
Tramo E	87,9	6,6	30,0
Tramo F	90,4	10,5	28,0
Tramo I	78,3	16,9	18,0
Tramo J	65,9	2,8	3,0
TOTAL	90,0		393

Fuente: Unidad de Auditoría Técnica Externa, LanammeUCR, 2015 (modificado por autor)

4.2.3. Gradiente térmico

Con respecto a los factores climáticos que afectan el pavimento se decidió considerar un gradiente de temperatura lineal, siendo positivo para los casos en los que se analiza el agrietamiento de abajo hacia arriba y negativo en los casos en que se analiza el agrietamiento de arriba hacia abajo. Vega, 2012, recomienda usar un gradiente térmico positivo de hasta 4°F/in y uno negativo de -4°F/in, sin embargo, se optó por usar gradientes de 2 y -2°F/in dado que este es el diferencial máximo que muestra el MEPDG para el caso de un día típico de verano en Estados Unidos a las 2:00pm (ver Figura 12), por lo que se consideró el diferencial de 4°F/in poco realista para las condiciones del país.

4.2.4. Agrietamiento transversal de abajo hacia arriba

Tal como se explicó en el capítulo 2, la existencia del gradiente térmico positivo provoca una curvatura convexa, provocando un vacío o pérdida de soporte bajo al centro de la losa (Monge, 2013), lo cual junto a una carga repetitiva de ejes pesados genera daños por fatiga a lo largo del borde inferior de la losa y un eventual agrietamiento en la misma (Vega, 2012). Esta condición se logra aunado al gradiente térmico positivo, propiciando la colocación del camión de diseño según los criterios de falla que muestra el MEPDG que es ubicando el eje direccional al centro de la losa en el sentido longitudinal y cerca de la junta en el sentido transversal. Lo anterior dado que en el eje direccional es donde se da una mayor relación entre la carga y el número de llantas.

La Figura 42 muestra la ubicación de los ejes del camión utilizada en la modelación en ISLAB2000.

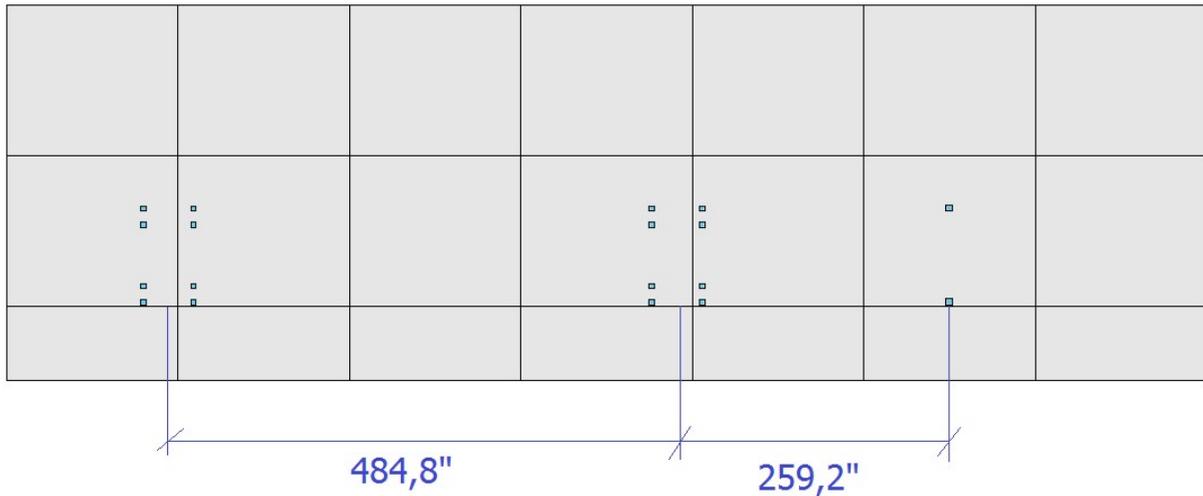


Figura 42. Configuración de carga para agrietamiento de abajo hacia arriba.

4.2.5. Agrietamiento transversal de arriba hacia abajo

Similar al caso anterior, se utilizó un gradiente térmico, en este caso negativo y se trató de seguir los criterios de falla del MEPDG, sin embargo, en el caso de agrietamiento de arriba hacia abajo, se busca colocar los ejes del camión de diseño en ambos extremos de la losa desde el punto de vista longitudinal, lo cual no es posible dadas las dimensiones de la losa. Se siguió la recomendación de Vega, 2012, la cual indica que se deben colocar los ejes del vehículo T3-S2 lo más cerca posible de una junta transversal, así como de la junta longitudinal, lo cual sumado al gradiente de temperatura genera mayores esfuerzos de tensión en la parte superior de la losa. (Vega, 2012).

La Figura 43 muestra la ubicación de los ejes del camión utilizada en la modelación en ISLAB2000.

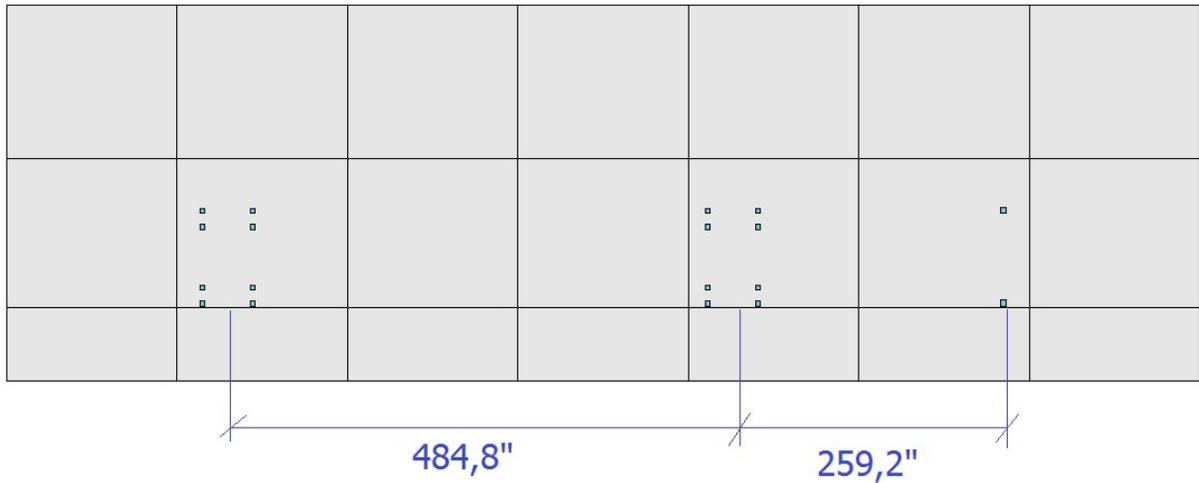


Figura 43. Configuración de carga para agrietamiento de abajo hacia arriba.

4.3. Resultados de la modelación en ISLAB2000

Para la revisión por fatiga del diseño mecanicista se analizaron 6 modelos en el ISLAB2000: agrietamiento de abajo hacia arriba de la losa de concreto mezcla 1; agrietamiento de arriba hacia abajo de la losa de concreto mezcla 1; agrietamiento de abajo hacia arriba de la losa de concreto mezcla 2; agrietamiento de arriba hacia abajo de la losa de concreto mezcla 2; agrietamiento de abajo hacia arriba de la losa de concreto mezcla 3 y agrietamiento de abajo hacia arriba de la losa de concreto mezcla 3.

En el Cuadro 24 se muestran los esfuerzos y deflexiones máximas calculados por el software y de las Figuras 44 a la 49 se muestran los resultados completos. La convención de signos de ISLAB2000 es para los esfuerzos tensión es positivo y compresión es negativo y para las deflexiones hundimientos es positivo y negativo para el caso contrario.

Cuadro 24. Esfuerzos y deformaciones obtenidos mediante ISLAB2000, mezcla 1

Criterio de falla	Respuesta Mecánica	Máximo o mínimo	Coordenadas (in)	
			X	Y
Agrietamiento de abajo hacia arriba	σ_x arriba (psi)	26,9	47,3	653,6
		-87,0	166,8	898,7
	σ_x abajo (psi)	87,0	166,8	898,7
		-26,9	47,3	653,6
	σ_y arriba (psi)	45,3	71,0	700,3
		-178,1	71,0	898,7
	σ_y abajo (psi)	178,1	71,0	898,7
		-45,3	71,0	700,3
	$\sigma_{m\acute{a}x}$ arriba (psi)	45,7	71,0	700,3
	$\sigma_{m\acute{a}x}$ abajo (psi)	178,1	71,0	898,7
$\delta_{m\acute{a}x}$ (in)	0,03	71,0	653,6	
$\delta_{m\acute{i}n}$ (in)	0,01	0,0	735,3	
Agrietamiento de arriba hacia abajo	σ_x arriba (psi)	25,8	106,5	954,2
		-59,6	164,0	187,7
	σ_x abajo (psi)	59,6	164,0	186,7
		-25,8	106,5	954,2
	σ_y arriba (psi)	52,1	71,0	123,7
		-115,0	71,0	954,2
	σ_y abajo (psi)	115,0	71,0	954,2
		-52,1	71,0	123,7
	$\sigma_{m\acute{a}x}$ arriba (psi)	52,1	71,0	123,7
	$\sigma_{m\acute{a}x}$ abajo (psi)	115,5	71,0	954,2
$\delta_{m\acute{a}x}$ (in)	0,028	71,0	686,2	
$\delta_{m\acute{i}n}$ (in)	0,010	0,0	787,5	

Cuadro 25. Esfuerzos y deformaciones obtenidos mediante ISLAB2000, mezcla 2

Criterio de falla	Respuesta Mecánica	Máximo o mínimo	Coordenadas (in)	
			X	Y
Agrietamiento de abajo hacia arriba	σ_x arriba (psi)	21,9	47,3	653,6
		-65,4	166,8	898,7
	σ_x abajo (psi)	65,4	166,8	898,7
		-21,9	47,3	653,6
	σ_y arriba (psi)	38,8	71,0	700,3
		-187,9	71,0	898,7
	σ_y abajo (psi)	187,9	71,0	898,7
		-38,8	71,0	700,3
	$\sigma_{m\acute{a}x}$ arriba (psi)	39,8	71,0	700,3
	$\sigma_{m\acute{a}x}$ abajo (psi)	189,0	71,0	898,7
$\delta_{m\acute{a}x}$ (in)	0,03	71,0	653,6	

	δ_{\min} (in)	0,01	0,0	58,3
Agrietamiento de arriba hacia abajo	σ_x arriba (psi)	27,1	106,5	954,2
		-63,1	164,0	187,7
	σ_x abajo (psi)	63,1	164,0	186,7
		-27,1	106,5	954,2
	σ_y arriba (psi)	57,1	71,0	123,7
		-119,2	71,0	954,2
	σ_y abajo (psi)	119,2	71,0	954,2
		-57,1	71,0	123,7
	σ_{\max} arriba (psi)	57,1	71,0	123,7
	σ_{\max} abajo (psi)	119,7	71,0	954,2
δ_{\max} (in)	0,02	71,0	686,2	
δ_{\min} (in)	0,01	0,0	787,5	

Cuadro 26 Esfuerzos y deformaciones obtenidos mediante ISLAB2000, mezcla 3

Criterio de falla	Respuesta Mecánica	Máximo o mínimo	Coordenadas (in)	
			X	Y
Agrietamiento de abajo hacia arriba	σ_x arriba (psi)	28,5	47,3	653,6
		-91,4	166,8	898,7
	σ_x abajo (psi)	91,4	166,8	898,7
		-28,5	47,3	653,6
	σ_y arriba (psi)	52,5	71,0	700,3
		-193,4	71,0	898,7
	σ_y abajo (psi)	193,4	71,0	898,7
		-52,5	71,0	700,3
	σ_{\max} arriba (psi)	53,1	71,0	700,3
	σ_{\max} abajo (psi)	193,4	71,0	898,7
δ_{\max} (in)	0,03	71,0	653,6	
δ_{\min} (in)	0,01	0,0	58,3	
Agrietamiento de arriba hacia abajo	σ_x arriba (psi)	37,3	106,5	954,2
		-81,1	164,0	187,7
	σ_x abajo (psi)	81,1	164,0	186,7
		-37,3	106,5	954,2
	σ_y arriba (psi)	69,5	71,0	123,7
		-160,1	71,0	954,2
	σ_y abajo (psi)	160,1	71,0	954,2
		911,2	71,0	123,7
	σ_{\max} arriba (psi)	69,5	71,0	123,7
	σ_{\max} abajo (psi)	160,7	71,0	954,2
δ_{\max} (in)	0,03	71,0	686,2	
δ_{\min} (in)	0,01	0,0	787,5	

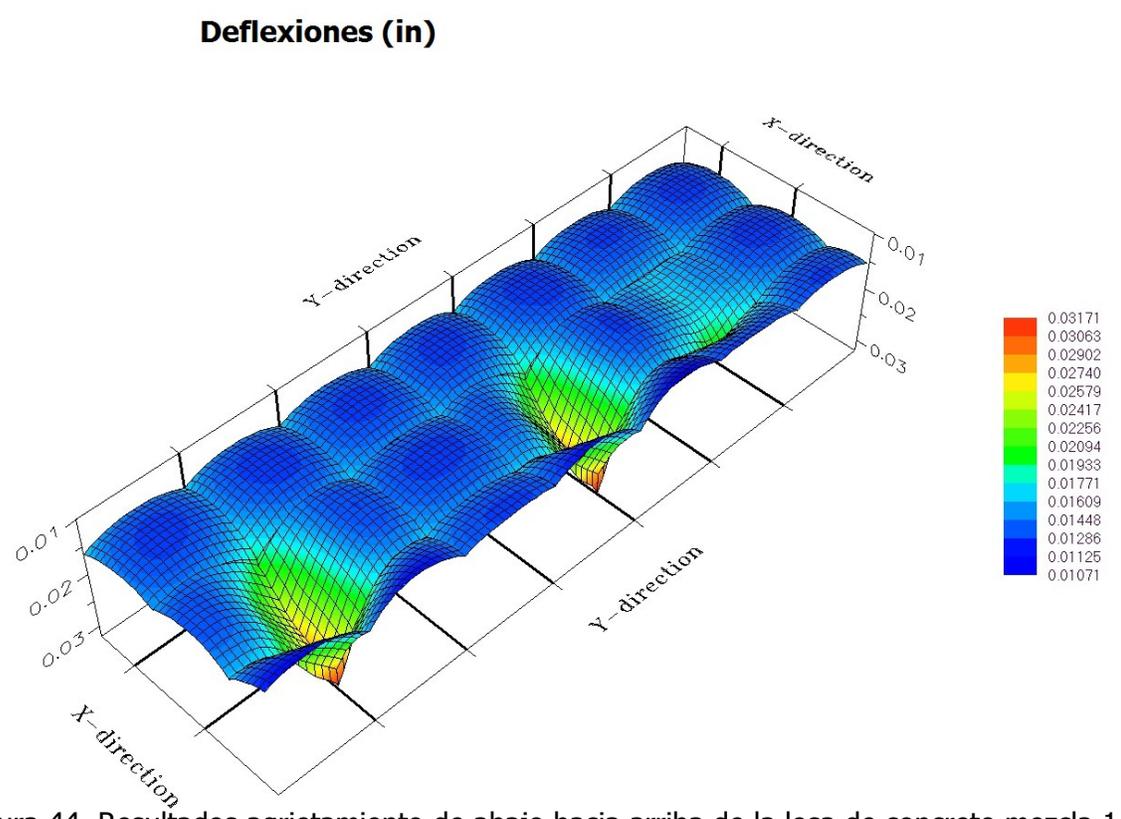
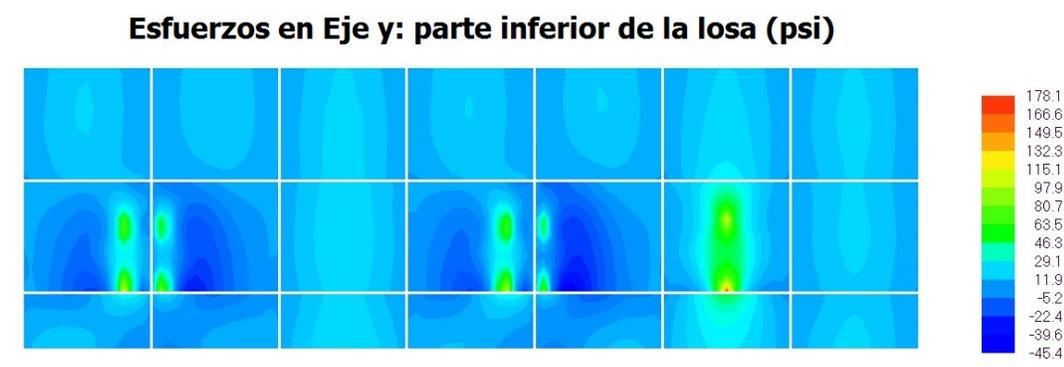
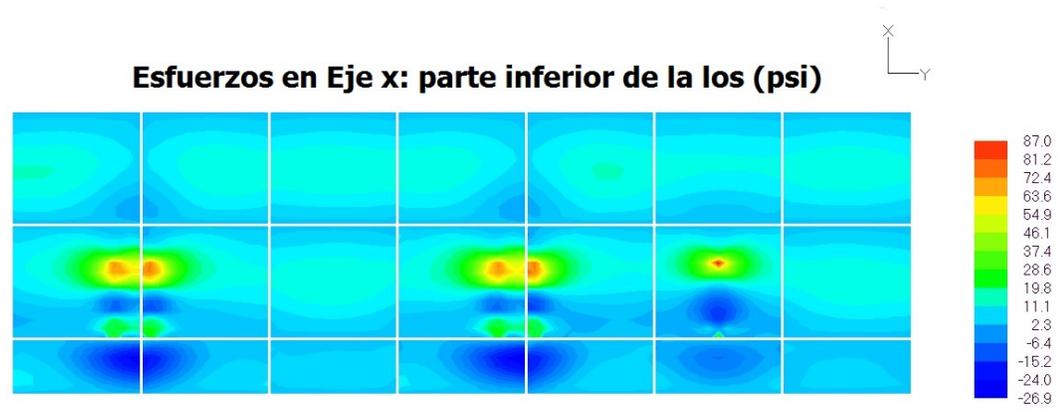
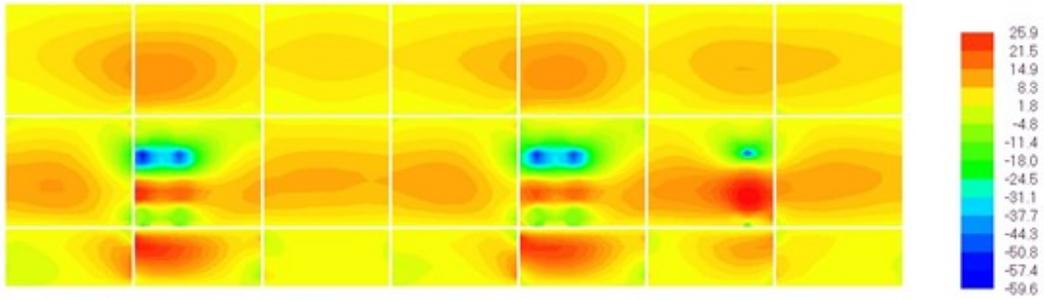
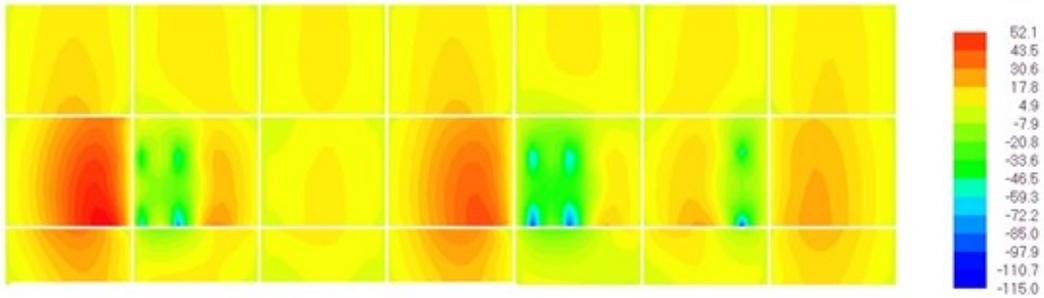


Figura 44. Resultados agrietamiento de abajo hacia arriba de la losa de concreto mezcla 1

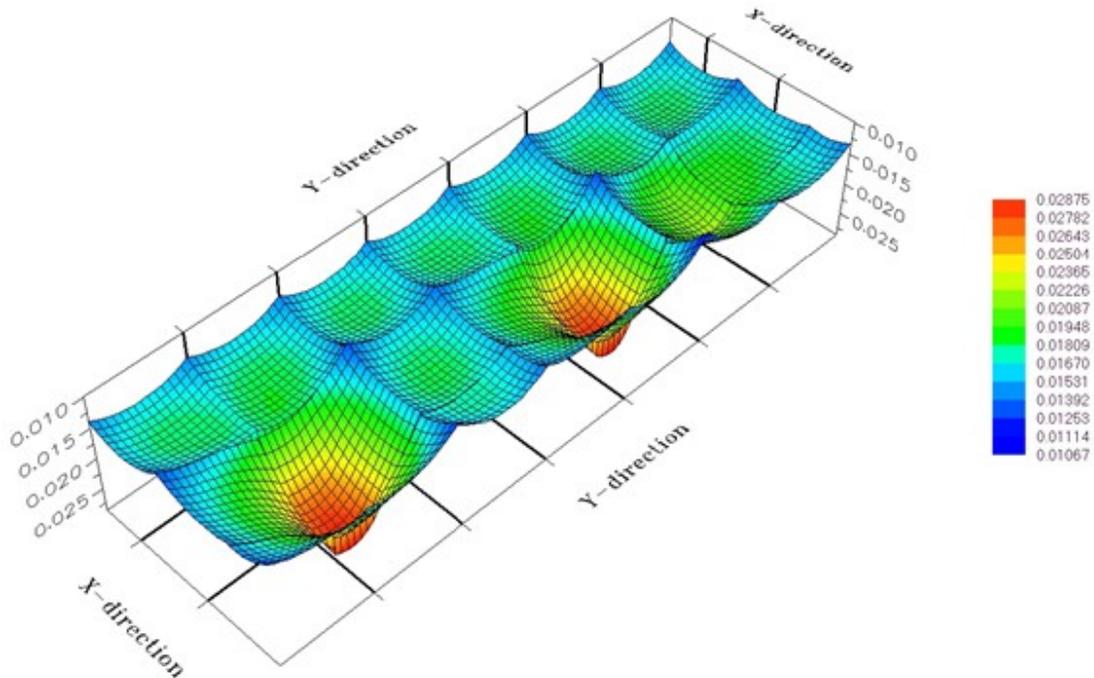
Esfuerzos en Eje x. Parte superior de la losa (psi)



Esfuerzos en Eje y. Parte superior de la losa (psi)



Deflexiones (in)



Fig

ura 45. Resultados agrietamiento de arriba hacia abajo de la losa de concreto mezcla 1

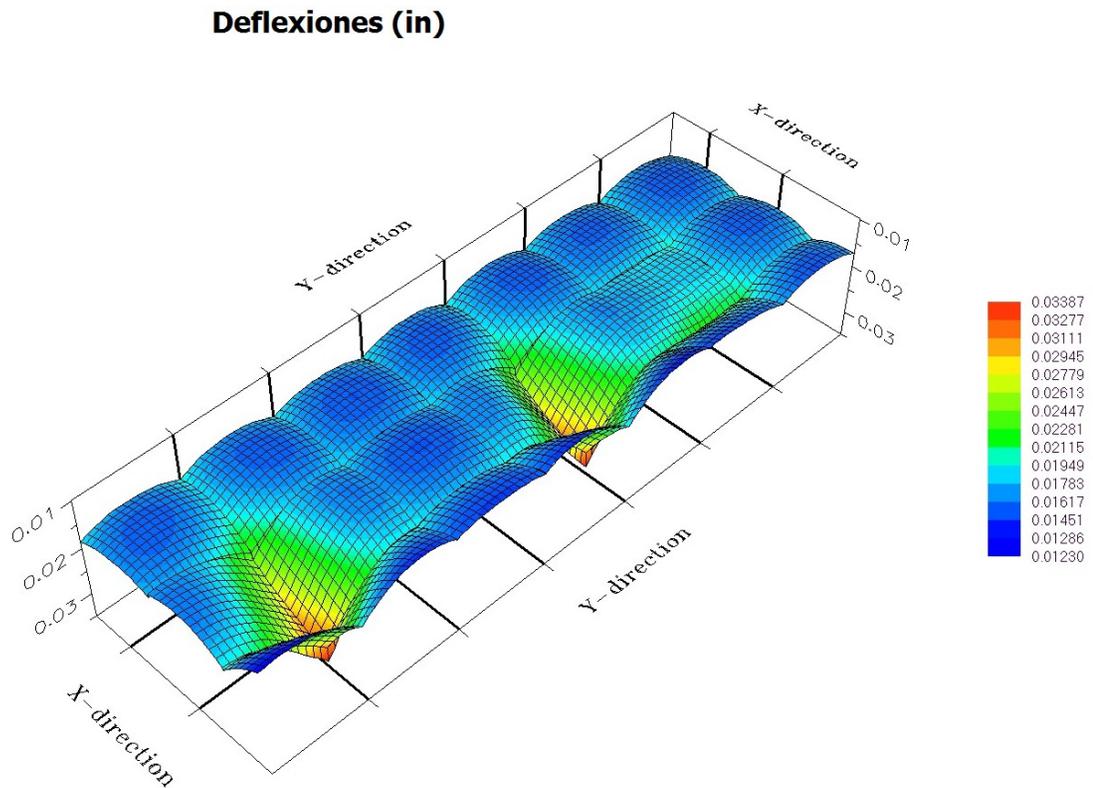
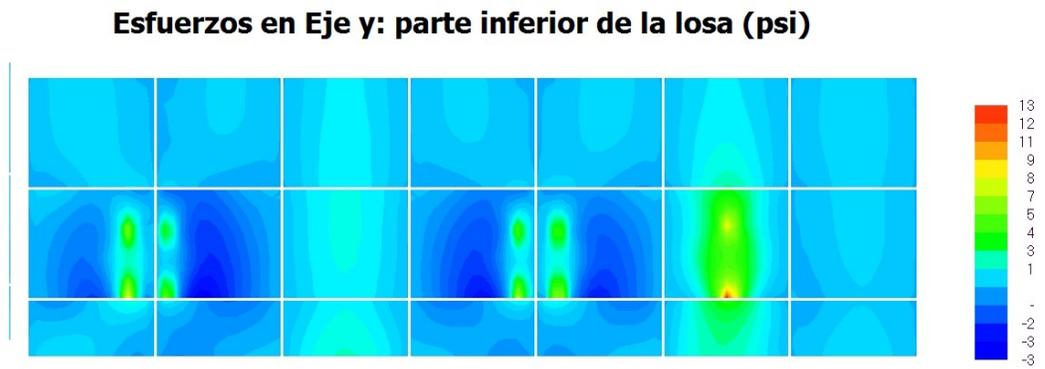
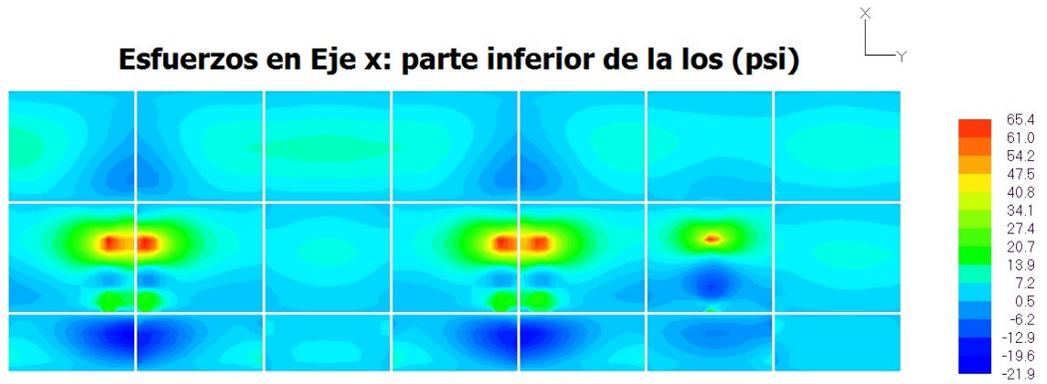
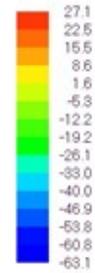
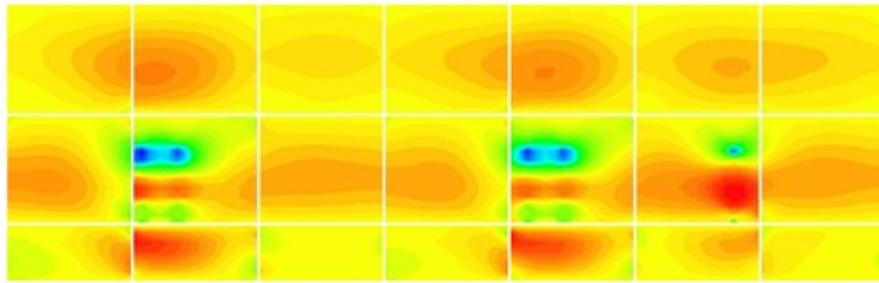
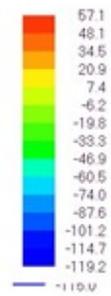
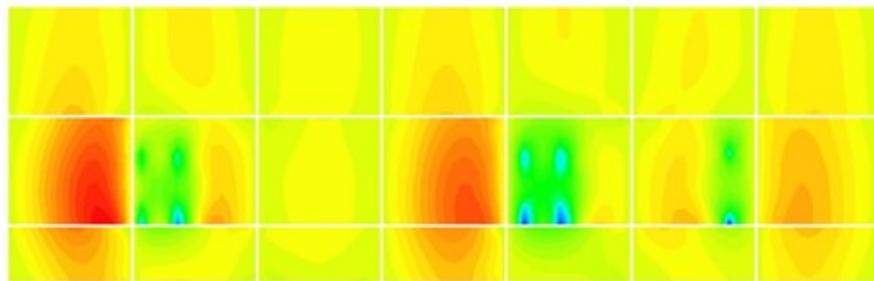


Figura 46. Resultados agrietamiento de abajo hacia arriba de la losa de concreto mezcla 2

Esfuerzos en Eje x. Parte superior de la losa (psi)



Esfuerzos en Eje y. Parte superior de la losa (psi)



Deflexiones (in)

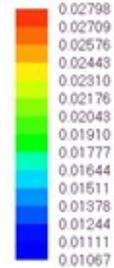
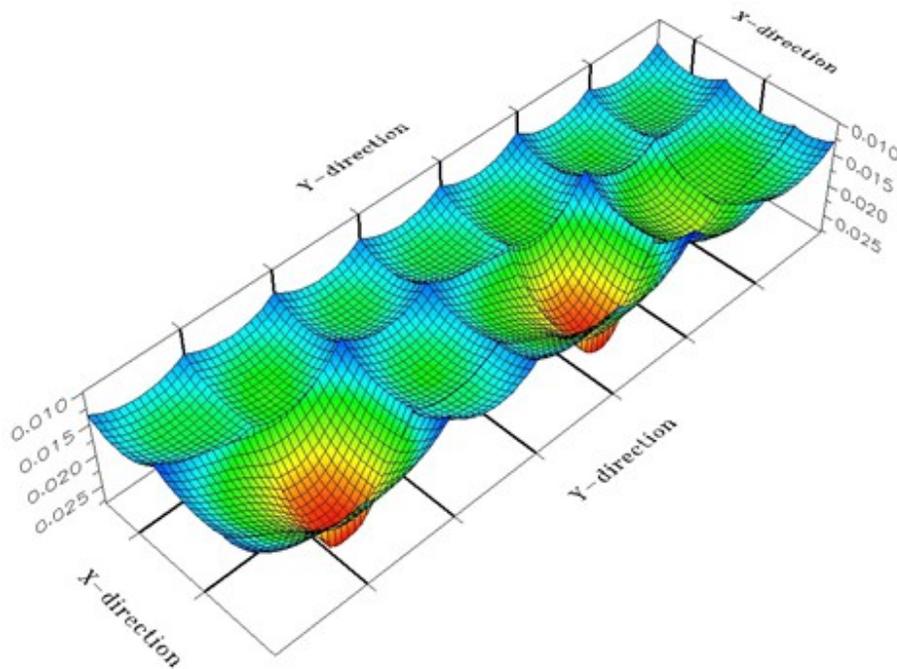


Figura 47. Resultados agrietamiento de arriba hacia abajo de la losa de concreto mezcla 2

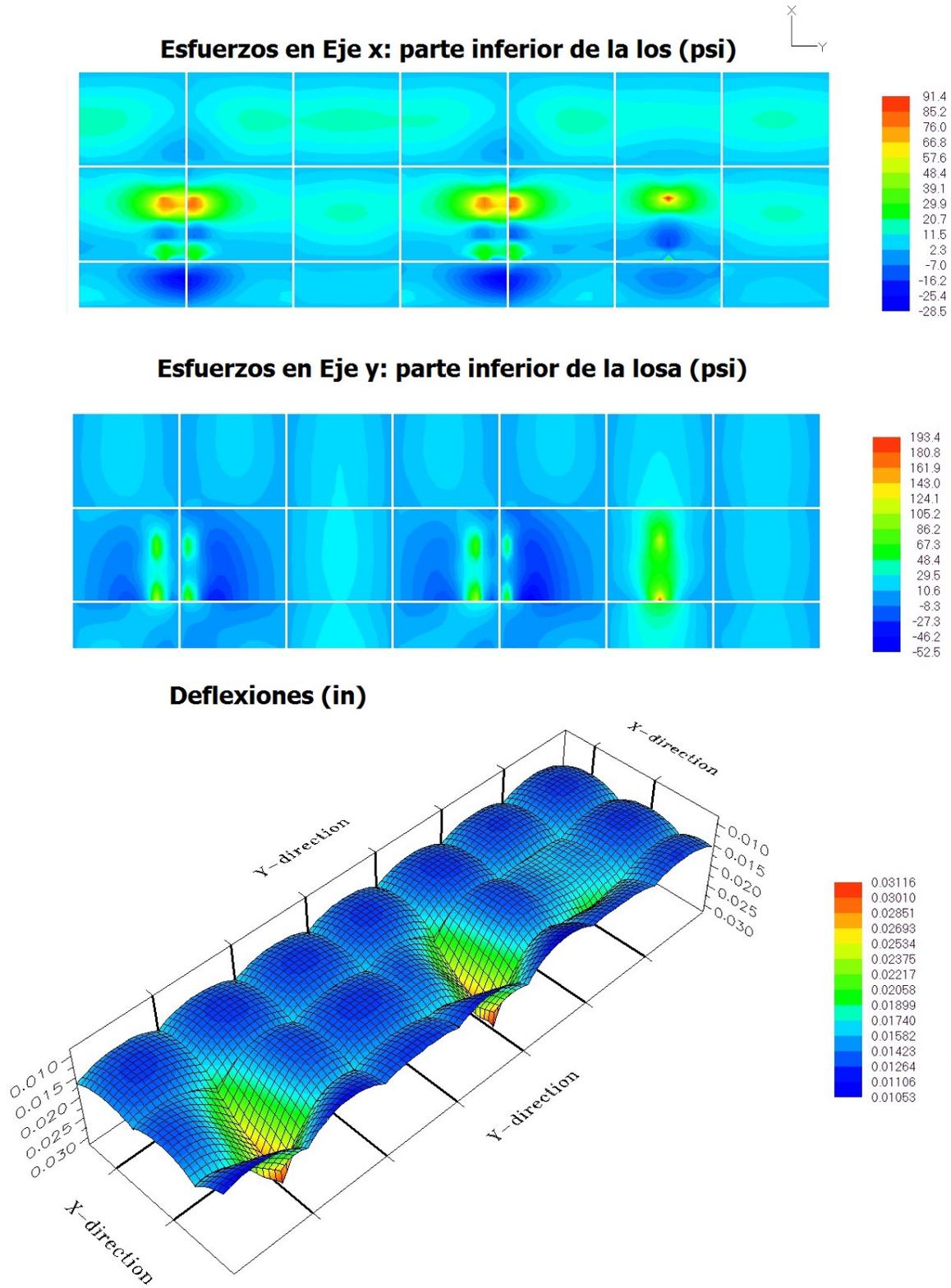
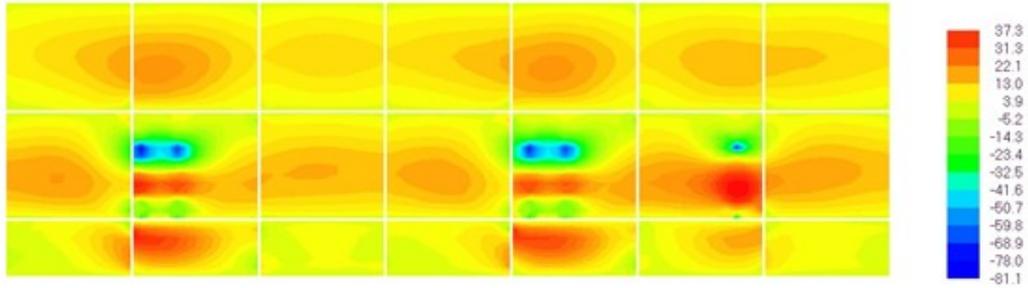
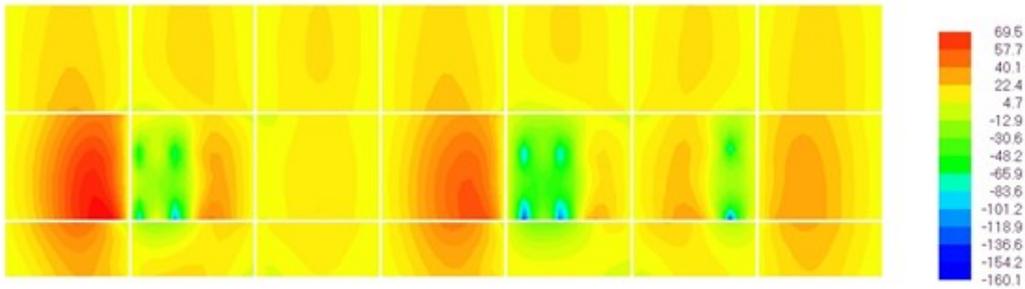


Figura 48. Resultados agrietamiento de abajo hacia arriba de la losa de concreto mezcla 3

Esfuerzos en Eje x. Parte superior de la losa (psi)



Esfuerzos en Eje y. Parte superior de la losa (psi)



Deflexiones (in)

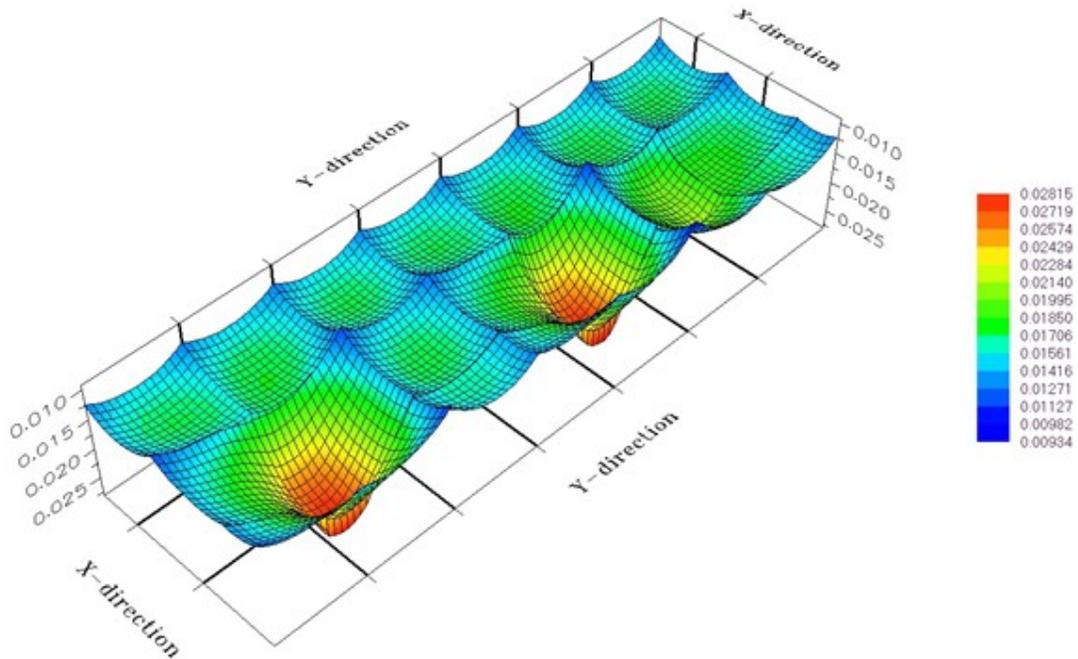


Figura 49. Resultados agrietamiento de abajo hacia arriba de la losa de concreto mezcla 3

Cuadro 27. Resultados al aplicar la ecuación de fatiga

	Mezcla 1		Mezcla 2		Mezcla 3	
Agrietamiento de:	abajo hacia arriba	arriba hacia abajo	abajo hacia arriba	arriba hacia abajo	abajo hacia arriba	arriba hacia abajo
Esfuerzo aplicado. MPa (psi)	1,23 (178,1)	0,80 (115,5)	1,30 (189,0)	0,83 (119,7)	1,33 (193,4)	1,11 (160,7)
Módulo de Ruptura. MPa (psi)	4,2 (614,4)	4,2 (614,4)	4,1 (587,4)	4,1 (587,4)	5,6 (810,7)	5,6 (810,7)
Relación de Esfuerzos	0,29	0,18	0,32	0,20	0,24	0,19
Repeticiones Admisibles	$3,78 \times 10^9$	$3,13 \times 10^{13}$	$5,43 \times 10^{13}$	$3,11 \times 10^{20}$	$5,47 \times 10^9$	$1,12 \times 10^{11}$

En los casos en que se analizó el agrietamiento de abajo hacia arriba para los 3 tipos de muestras, se nota como efectivamente la configuración de carga propuesta en la Figura 42 da los mayores esfuerzos en la parte central de la losa en su sentido longitudinal y cerca del borde de la losa, además, los mayores esfuerzos se dan justo debajo de la carga de 6 ton correspondiente al eje simple direccional. En el caso del primer tipo de concreto se obtuvo un esfuerzo máximo de 178,1 psi (1,23 MPa), para el segundo tipo de concreto dio un esfuerzo de 189,0psi (1,30Mpa) y para el tercero 193,4psi (1,33MPa) desde ya podemos notar como los esfuerzos a flexión son muy pequeños comparados con la resistencia a flexión que poseen los concretos. Además, se nota como el concreto con menor módulo de elasticidad (mezcla 1) le corresponde un menor esfuerzo, y este patrón se repite en los otros concretos, es decir a mayor módulo mayor esfuerzo, lo cual es fácilmente comprensible ya que al ser un material más rígido, distribuye mejor los esfuerzos, y es menor la transmisión de esfuerzos a las capas inferiores del pavimento, tal como se pretende en los pavimentos rígidos, en donde se busca que toda la carga sea soportada por la losa, contrario a los pavimentos flexibles en donde todas las capas se diseñan en conjunto para soportar los esfuerzos y no solo la carpeta asfáltica. Sin embargo, al mismo tiempo, los materiales más rígidos, como el caso de la muestra 3,

precisamente por soportar esfuerzos mayores están más susceptibles a agrietamiento de abajo hacia arriba dada la carga cíclica que debe soportar.

En el Cuadro 27 se muestra la razón de esfuerzos provocada por estos esfuerzos a tensión en la base de la losa, los cuales son muy pequeños, de 0,23 para la mezcla 3, 0,29 para la mezcla 1 y 0,32 para la mezcla 2, lo cual provoca repeticiones de carga muy altas del orden de 10^9 a 10^{13} , lo cual es poco realista debido a que los modelos de fatiga no han sido calibrados con factores de correlación campo laboratorio, lo cual es fundamental para la mejora de los modelos. Además, cabe destacar que los modelos de fatiga se obtuvieron a partir de ensayos de carga cíclica que provocaban a las vigas de concreto razones de esfuerzo mayores a los que realmente provoca un camión T3-S2, según los resultados obtenidos mediante los procedimientos de elemento finito de ISLAB2000.

En las Figuras 44, 46 y 48 se muestran todos los resultados en forma gráfica, se puede notar efectivamente como hay esfuerzos de tensión cerca de la ubicación de las llantas el resto de la losa muestra colores celestes y azules, correspondientes a tensiones menores e incluso a compresión principalmente en los sectores alrededor de los ejes tándem. Lo cual nos muestra como la configuración de carga si es representativa para analizar agrietamiento de abajo hacia arriba. Por otra parte, las deflexiones muestran una curvatura convexa, lo cual se debe principalmente al gradiente de temperatura positivo y mayores deflexiones obviamente donde los ejes del camión están en contacto con la losa.

Para los casos de análisis de agrietamiento de arriba hacia abajo, como se mencionó anteriormente no es posible ubicar dos ejes del camión en los extremos de las losas debido a las dimensiones reducidas de las losas (4,15m en este caso) por lo que se colocaron los ejes cerca de las juntas para tratar de provocar el caso más crítico de tensión arriba. Los Cuadros 24, 25 y 26, efectivamente se lograron esfuerzos mayores en la parte superior de las losas con la configuración de carga propuesta que con la configuración utilizada para el caso de análisis de agrietamiento de arriba hacia abajo, sin embargo no se puede garantizar que esa sea la condición más crítica experimentada por la losa. Los esfuerzos máximos en la superficie de la losa son de 52,1 psi, 57,2psi y 69,5 psi para el primero, segundo y tercer tipo de mezcla respectivamente.

En cuanto a los esfuerzos máximos a tensión en la parte inferior de la losa (para lo cual fueron diseñados los modelos de fatiga), se obtuvieron esfuerzos menores que los casos de

agrietamiento de abajo hacia arriba, lo cual nos confirma que estos eran los máximos; los valores obtenidos son de 115,5 psi (0,80MPa) para el primer tipo de concreto, 119,7 psi (0,83 MPa) para el segundo tipo de concreto y 160,7 (1,11MPa). Nuevamente a mayor módulo mayores esfuerzos son soportados por la losa.

Las Figuras 45, 47 y 49 muestran los resultados gráficamente de todos los esfuerzos. Destaca el hecho de que las tensiones máximas en la parte superior de la losa se dan una losa detrás de la losa en la cual se tienen los ejes tándem, lo cual muestra que hay una eficiente transferencia de carga (que se modelo como 90%), por su parte las compresiones máximas se obtienen en la ubicación de los ejes del camión. En cuanto a las deflexiones estas muestran una curvatura cóncava debido a la presencia del gradiente térmico negativo y mayor deflexión en la ubicación de los ejes del camión; en cuanto a la magnitud de las deflexiones máximas estas son menores que el caso de análisis de agrietamiento de abajo hacia arriba, siendo aproximadamente de 0,028in contra 0,033in.

El Cuadro 27 resume los resultados de razones de esfuerzos y repeticiones admisibles donde se tienen razones de esfuerzo de 0,18, 0,20 y 0,19 para las mezclas uno dos y tres respectivamente, lo que conlleva a repeticiones admisibles muy grandes en el orden de magnitud de 10^{11} a 10^{20} . Destaca el hecho de que para el modelo 2 de fatiga, las repeticiones admisibles son más altas que para los otros dos modelos, lo cual amerita que este modelo además de la calibración campo-laboratorio, también debería mejorarse con más especímenes de falla, para descartar alguna viga cuyo comportamiento se aleje de la norma, en especial si tomamos en cuenta que este modelo se calculó con solo 6 ensayos de fatiga.

4.4. Análisis con el programa ApRIGID 1.0

El programa computacional Análisis de Pavimentos Rígidos (ApRIGID), es una herramienta desarrollada en el lenguaje de programación JAVA para facilitar el cálculo de respuestas mecánicas de importancia para el diseño de pavimentos rígidos bajo la metodología empírico mecanicista. (Quirós, 2015). ApRIGID 1.0 fue desarrollado por la unidad de Materiales y Pavimentos del PITRA-LanammeUCR.

El programa solicita el ingreso de ocho parámetros: la separación entre juntas, el módulo elástico del concreto, el espesor de la losa, el diferencial térmico entre la superficie y la base de la losa, el coeficiente de reacción de la subrasante (bajo principios de fundación líquida de

Winkler), el módulo elástico de la base, el diámetro de las dovelas de transferencia de carga y la eficiencia de transferencia de carga (LTE). La Figura 50 muestra una salida típica del programa, en donde destaca el hecho de que para analizar esfuerzos máximos en la superficie de la losa, modela el caso en el que dos ejes se encuentran en los extremos de la losa.

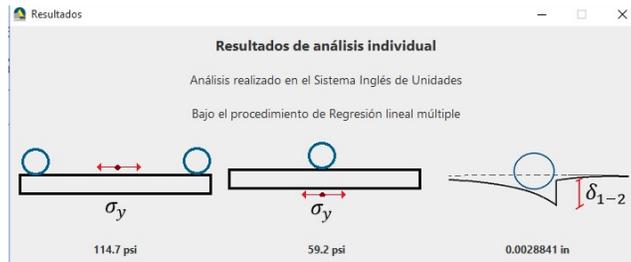


Figura 50. Salida típica del software ApRIGID 1.0

Los valores utilizados se muestran en el Cuadro 28.

Cuadro 28. Parámetros utilizados en el software ApRIGID 1.0

Parámetro	Valor
Módulo elástico Mezcla 1. MPa (Ksi)	23 800 (3 400)
Módulo elástico Mezcla 2. MPa (Ksi)	31 900(4 600)
Módulo elástico Mezcla 3. MPa (Ksi)	33 090 (4 799,3)
Separación entre juntas. m (ft)	4,15 (13,6)
Espesor de la losa. m (in)	0,25 (9,84)
Diferencial térmico. °C (°F)	±10,9 (±19,7)
Coefficiente k de la subrasante. MPa/m (pci)	48,6 (180)
Módulo elástico de la base. MPa (Ksi)	4 480 (650)
Diámetro de las dovelas. m (in)	0,03 (1,2)
LTE	90%

Los resultados obtenidos por ApRIGID1.0 son los siguientes:

Cuadro 29. Deflexión máxima obtenida mediante ApRIGID1.0

Método	Mezcla 1		Mezcla 2		Mezcla 3	
	Regresión Lineal	Redes Neuronales Artificiales	Regresión Lineal	Redes Neuronales Artificiales	Regresión Lineal	Redes Neuronales Artificiales
Agrietamiento de abajo hacia arriba, m (in)	6,63x10 ⁻⁵ (2,6x10 ⁻³)	6,23x10 ⁻⁵ (2,4x10 ⁻³)	6,65x10 ⁻⁵ (2,6x10 ⁻³)	6,08x10 ⁻⁵ (2,4x10 ⁻³)	6,65x10 ⁻⁵ (2,6x-3)	6,06x10 ⁻⁵ (2,4x10 ⁻³)
Agrietamiento de arriba hacia abajo, m	6,63x10 ⁻⁵ (2,6x10 ⁻³)	6,23x10 ⁻⁵ (2,4x10 ⁻³)	6,65x10 ⁻⁵ (2,6x10 ⁻³)	6,08x10 ⁻⁵ (2,4x10 ⁻³)	6,65x10 ⁻⁵ (2,6x-3)	6,06x10 ⁻⁵ (2,4x10 ⁻³)

(in)						
------	--	--	--	--	--	--

Cuadro 30. Esfuerzo máximo obtenido en la superficie de la losa

Método	Mezcla 1		Mezcla 2		Mezcla 3	
	Regresión Lineal	Redes Neurales Artificiales	Regresión Lineal	Redes Neurales Artificiales	Regresión Lineal	Redes Neurales Artificiales
Agrietamiento de abajo hacia arriba. MPa (psi)	-0,54 (-78,5)	-0,45 (-65,2)	-0,63 (-91,5)	-0,51 (-74,3)	-0,65 (-93,9)	-0,52 (-75,8)
% error	9,77	25,05	39,83	13,54	2,75	17,06
Agrietamiento de arriba hacia abajo. MPa (psi)	1,05 (151,7)	1,05 (152,9)	1,26 (182,4)	1,18 (171,8)	1,29 (187,4)	1,21 (175,0)
%error	191,45	193,75	219,50	200,93	169,63	151,79

Cuadro 31. Esfuerzo máximo en la parte inferior de la losa

Método	Mezcla 1		Mezcla 2		Mezcla 3	
	Regresión Lineal	Redes Neurales Artificiales	Regresión Lineal	Redes Neurales Artificiales	Regresión Lineal	Redes Neurales Artificiales
Agrietamiento de abajo hacia arriba. MPa (psi)	1,30 (189,1)	1,25 (181,8)	1,50 (217,4)	1,36 (197,1)	1,53 (221,9)	1,37 (199,5)
% error	6,17	2,07	15,04	4,30	14,71	3,13
Repeticiones admisibles	1,09x10 ⁹	2,46x10 ⁹	4,63x10 ¹¹	1,30x10 ¹³	5,84x10 ⁸	3,31x10 ⁹
Agrietamiento de arriba hacia abajo. MPa (psi)	-0,11 (-15,9)	-0,20 (-29,2)	-0,17 (-24,4)	-0,15 (-21,6)	-0,18 (-26,0)	-0,14 (-20,5)
% error	38,49	12,96	9,88	20,22	30,35	45,08

En el Cuadro 30 se muestra los esfuerzos máximos obtenidos en la superficie de la losa, donde se tiene que para el caso de agrietamiento de abajo hacia arriba (diferencial térmico positivo), los esfuerzos máximos son negativos, es decir son esfuerzos a compresión, sin embargo en el caso de agrietamiento de arriba hacia abajo, si se lograron esfuerzos a tensión esto debido a que el programa calcula este esfuerzo bajo una configuración de ejes con dos ejes uno a cada extremo longitudinal de la losa, como se muestra en la Figura 50, por ese motivo los esfuerzos para agrietamiento de arriba hacia abajo dan valores mucho mayores a los obtenidos mediante el ISLAB2000, valores mayores a los 150psi lo que explica el agrietamiento de arriba hacia

abajo, lo que no se logró modelar adecuadamente en el ISLAB2000 con un solo camión, Lo anterior también explica el hecho que los porcentajes de error de estos valores son tan altos, lo que no evidencia una deficiencia en el software ApRigid, sino que más bien se debe a que no se logró modelar la condición idónea para proveer agrietamiento de arriba hacia abajo en el ISLAB2000. De forma opuesta, al ser adecuada la configuración de ejes para el agrietamiento de abajo hacia arriba, notamos porcentajes de error menores al comparar los resultados de ambos software, considerando como válidos los obtenidos mediante el ISLAB2000.

En cuanto a los valores de esfuerzo a tensión en la parte inferior de la losa, se tiene que los resultados obtenidos mediante el software ISLAB2000, lo cual, de tomarse como reales los esfuerzos calculados en ISLAB2000, podemos concluir que el programa ApRIGID calcula esfuerzos de manera conservadora, lo cual es recomendable para efectos de diseño. Como efecto adicional a lo anteriormente citado, se puede ver en el Cuadro 31 como las repeticiones de carga admisibles dan valores menores a los obtenidos con el ISLAB2000.

Por último, las deflexiones mostradas en el Cuadro 29 corresponden a la deflexión entre las losas en las juntas y conservan valores entre 0,0023 a 0,0026 in.

4.5. Otros modelos de fatiga

En esta sección se muestran los resultados de aplicar las razones de esfuerzo calculadas mediante ISLAB2000 a las distintas ecuaciones de fatiga encontradas en la investigación bibliográfica. Se escogió hacer estos cálculos con la ecuación calibrada del MEPDG y los modelos cero mantenimiento, Foxworthy, ERES/COE, ARE, RISC y Vesic. En cuanto al modelo calibrado por la PCA, tal como se indica en el Cuadro 1, para razones de esfuerzo menores a 0,45 el modelo no presenta ninguna ecuación y define el número de repeticiones admisibles como un valor no limitado. Los resultados se muestran en el Cuadro 32.

Cuadro 32. Número de repeticiones admisibles según los modelos de fatiga.

Modelo	Agrietamiento de:					
	abajo hacia arriba	arriba hacia abajo	abajo hacia arriba	arriba hacia abajo	abajo hacia arriba	arriba hacia abajo
Relación de Esfuerzos	0,29	0,18	0,32	0,2	0,24	0,19
MEPDG	$3,11 \times 10^9$	$4,37 \times 10^{16}$	$2,94 \times 10^8$	$4,85 \times 10^{14}$	$6,98 \times 10^{11}$	$4,04 \times 10^{15}$
Cero mantenimiento	$3,21 \times 10^{12}$	$2,77 \times 10^{14}$	$9,51 \times 10^{11}$	$1,23 \times 10^{14}$	$2,43 \times 10^{13}$	$1,85 \times 10^{14}$
Foxworthy	$1,41 \times 10^5$	$8,67 \times 10^7$	$5,28 \times 10^4$	$1,60 \times 10^7$	$1,26 \times 10^6$	$3,56 \times 10^7$
ERES/COE	$2,56 \times 10^9$	$4,73 \times 10^{16}$	$2,29 \times 10^8$	$4,94 \times 10^{14}$	$6,41 \times 10^{11}$	$4,24 \times 10^{15}$
ARE	$1,09 \times 10^6$	$4,77 \times 10^6$	$8,02 \times 10^5$	$3,44 \times 10^6$	$1,96 \times 10^6$	$4,03 \times 10^6$
RISC	$4,50 \times 10^6$	$3,48 \times 10^7$	$2,95 \times 10^6$	$2,21 \times 10^7$	$1,01 \times 10^7$	$2,76 \times 10^7$
Vesic	$5,22 \times 10^6$	$4,26 \times 10^7$	$3,38 \times 10^6$	$2,68 \times 10^7$	$1,20 \times 10^7$	$3,35 \times 10^7$

En cuanto al modelo cero mantenimiento, el modelo ERES/COE y a la ecuación calibrada del MEPDG, el número de repeticiones admisibles están en un orden de magnitud similar a los resultados obtenidos con los modelos de esta investigación, es decir en un orden de magnitud de 10^9 o superior, los otros modelos muestran valores en orden de magnitud menor.

Cabe destacar que estos modelos han sido calibrados de formas distintas en especial han sido verificados con calibraciones campo laboratorio y desarrollados para materiales y condiciones distintas a las que se presentan en el país, por lo que los valores mostrados en el Cuadro 32 únicamente nos sirven para tener una idea del orden de magnitud del número de repeticiones de carga.

Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

Se caracterizaron agregados y cementos para tres tipos de mezclas diferentes, las cuales dieron resultados aceptables para la elaboración de mezclas de concreto según lo normado por ASTM.

Para cada tipo de mezcla se realizaron ensayos estáticos y ensayos dinámicos de módulo dinámico y fatiga para distintas razones de esfuerzos, se graficaron para cada mezcla el número de repeticiones de carga contra la razón de esfuerzo para obtener tres modelos de fatiga. Para el concreto tipo 1, se fallaron 9 vigas a fatiga y se llegó al siguiente modelo de fatiga, $\log(N) = \log(0,0241) - 20,83 \log(SR)$. Para el concreto elaborado con la mezcla 2 se fallaron 6 vigas a fatiga y el modelo correspondiente es $\log(N) = \log(0,0009) - 34,05 \log(SR)$ y para la mezcla 3, la cual se formó con materiales y diseño del proyecto Cañas-Liberia, se fallaron 11 vigas y se llegó al siguiente modelo de fatiga $\log(N) = \log(0,3938) - 16,3 \log(SR)$. El tercer modelo de fatiga genera, para una misma relación de esfuerzos, más número de repeticiones admisibles de carga, esto porque este modelo se desarrolló a partir de ensayos en un concreto más resistente que los otros y posiblemente más cercano a un concreto utilizado en un proyecto real.

Se desarrolló un modelo genérico de fatiga a partir de todos los ensayos de fatiga elaborados, incluyendo los obtenidos por Monge (2013), el modelo resultante es $\log(N) = \log(0,836) - 15,3 \log(SR)$, este modelo presenta un valor R^2 de 0,62, lo cual muestra la necesidad de calibrar estos modelos con más ensayos y así descartar estadísticamente los valores que se alejen de la norma.

Se modeló una estructura de pavimento idéntica a la utilizada en el proyecto Cañas-Liberia y se utilizó como propiedades de las capas los resultados de un estudio de retrocálculo de módulos a partir de ensayos de deflectometría de impacto realizado por el LanammeUCR. Se utilizó el software ISLAB2000 y se modeló además el efecto de un camión de diseño el cual se basa en la configuración de carga y geometría de un T3-S2. Se logró modelar adecuadamente una condición crítica para agrietamiento de abajo hacia arriba mediante la incorporación de un gradiente de temperatura positivo y la colocación del eje simple

direcciona al centro de la losa en el sentido longitudinal y cerca del borde de la losa en el sentido transversal. Sin embargo, no se logró modelar adecuadamente en ISLAB2000 una condición crítica para agrietamiento de arriba hacia abajo debido a que no era posible dadas las dimensiones de las losas, ubicar dos ejes del camión en los dos extremos longitudinales de una misma losa, esto a pesar de usar un gradiente negativo. Sin embargo, el programa ApRigid arrojó mejores resultados en la modelación del agrietamiento de arriba hacia abajo, dado que si considera el caso de dos ejes ubicados en una misma losa.

Los esfuerzos calculados mediante elemento finito con el programa ISLAB2000 o mediante redes neurales y regresión lineal múltiple mediante el software ApRIGID proporcionan razones de esfuerzo muy bajas, las cuales al aplicarles los modelos de fatiga calculados dan muchas repeticiones de carga admisibles, lo cual no es realista, por lo que se puede concluir que difícilmente un pavimento rígido típico (como los analizados en este proyecto con espesores en la losa de concreto mayores a 0,15m) va a fallar producto de cargas cíclicas de fatiga. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que los modelos obtenidos en esta investigación deben ser calibrados mediante más ensayos de laboratorio y monitoreo de tramos de pavimento en campo, para así poderle incorporar a los modelos los coeficientes de ajuste necesarios y así obtener resultados cada vez más confiables, reduciendo la incertidumbre y variabilidad en los resultados.

Al aplicar los valores de razones de esfuerzo obtenidos mediante el ISLAB2000 a las distintas ecuaciones de fatiga desarrolladas internacionalmente, se notó un patrón en el orden de magnitud de los resultados correspondientes al número de repeticiones admisibles, dando los modelos cero mantenimiento, el modelo ERES/COE y a la ecuación calibrada del MEPDG resultados similares en orden de magnitud a los valores obtenidos mediante los modelos desarrollados en esta investigación, por su parte los modelos Foxworthy, ARE, RISC y Veisc dan resultados menores a los modelos determinados experimentalmente.

La conclusión de que un pavimento difícilmente va a fallar por fatiga, nos debe impulsar a considerar los demás problemas por los que realmente fallan los pavimentos rígidos, tales como los problemas constructivos, fallas en las dovelas, falta de mantenimiento, mantenimiento insuficiente o inadecuado, fallas en las juntas por ejemplo con el ingreso de

incompresibles, problemas de drenaje, fallas en el suelo, falla de erosión por bombeo y escalonamiento, reducción de la regularidad superficial a un estado inaceptable o peligroso. A su vez el agrietamiento se debe analizar como consecuencia no solo de la carga y descarga que sufre el pavimento (fatiga) sino como una consecuencia del efecto combinado de todos los fenómenos antes mencionados.

La bibliografía consultada, específicamente las investigaciones del profesor Roesler aseguran que las losas completamente apoyadas soportan esfuerzos a flexión mayores en un 30% de los que soporta una viga simplemente apoyada, lo cual nos induce a pensar que al someter losas a esfuerzos de flexión mediante una carga cíclica, por ejemplo mediante el Simulador de Vehículos Pesados (HVS), obtendremos esfuerzos mayores, lo que conduciría a razones de esfuerzos mayores y a un menor número de repeticiones de carga hasta la falla por fatiga, además, el hecho de tener mayores esfuerzos en una losa que en una viga, nos ayuda a explicar parcialmente la ocurrencia del agrietamiento tan típica de las losas en los pavimentos rígidos.

La investigación sobre los procedimientos de diseño de la guía del MEPDG, nos permite concluir que para el desarrollo de metodologías mecanicistas aplicables a Costa Rica, tal como la guía de diseño empírico mecanicista de pavimento (CR-ME), es importante considerar todos los elementos que afectan el desempeño de los pavimentos rígidos, desde las características del tráfico y las condiciones climáticas a las que se verá sometido el pavimento, hasta los aspectos concernientes al diseño estructural y propiedades de los materiales. En cuanto a los aspectos climáticos destaca los gradientes por temperatura y los gradientes por humedad, especialmente esta última, ya que aunque nuestro país no presenta variaciones importantes en la temperatura (no hay ciclos de congelación y descongelación por ejemplo), si presenta una humedad importante en algunas regiones del país, además, se debe considerar el tema de las precipitaciones ya que el país presenta una estación lluviosa considerable, por lo que los aspectos de drenaje son relevante en el diseño de un pavimento. En cuanto a la estructura del pavimento destaca no solo el hecho de que se deben usar materiales idóneos para construcción, sino que todas las capas de la estructura del pavimento deben estar bien caracterizadas en propiedades como el módulo de elasticidad, módulo dinámico, módulo de ruptura, coeficiente de Poisson, k dinámico de la subrasante, entre otros, para poder tener una buena modelación de los pavimentos mediante el uso de software.

La guía de diseño MEPDG contempla además, todos los aspectos concernientes al diseño de pavimentos JPCP, según esta guía hay que tomar en cuenta el espaciamiento de juntas, el diseño de las dovelas, la erosión en la base, la interfaz entre la base y la losa, las propiedades mecánicas y características geométricas de las losas, la transferencia de carga en las juntas, el drenaje superficial, el diseño de los espaldones, la mejora de la subrasante. Además define los criterios de desempeño en pavimentos JPCP que serían el agrietamiento por fatiga, las fallas por juntas transversales o escalonamiento y la predicción de la regularidad.

Los métodos mecanicistas utilizados por el MEPDG muestra como el diseño de pavimentos se ve afectado por muchos parámetros que deben tomarse en cuenta, lo que debe ser reflejo para los investigadores y diseñadores costarricenses de la importancia de considerar y calibrar modelos y metodologías similares aplicables a nuestro entorno. El diseño puramente empírico, tal como el AASTHO93 resulta insuficiente dadas las nuevas tendencias mecanicistas hacia las que se dirige el diseño y análisis actual de pavimentos, principalmente si consideramos la importancia de proyectos viales de gran magnitud, como el proyecto Cañas- Liberia, y su gran relación con el desarrollo económico y social del país.

5.2. Recomendaciones

Se notó como el concreto tiene un comportamiento muy irregular cuando se es sometido a cargas cíclicas, por lo que es recomendable fallar más vigas mediante ensayos de fatiga para poder realizar estudios estadísticos de los resultados y descartar aquellas vigas que se salgan del patrón mostrado por la mayoría.

Se recomienda, para los ensayos de fatiga y módulo dinámico, el uso de accesorios muy estables que mantengas la viga fija, evitando cualquier tipo de oscilación en la misma.

Se recomienda en la medida de lo posible que de una misma colada de concreto se preparen especímenes tanto para ensayos dinámicos como estáticos. En esta investigación se notaron especialmente en las pruebas a fatiga como la variabilidad del concreto afecta enormemente los resultados a fatiga, dando para un mismo tipo de concreto sometido a una misma carga, números distintos de ciclos de carga hasta la ruptura, por lo que se recomienda seguir todos los procedimientos estandarizados para control de calidad del concreto, por ejemplo los procedimientos de mezclado, moldeado de especímenes, curado, entre otros.

Se recomienda investigar más sobre el efecto de la retracción por secado en las vigas en su resistencia a flexión, dado que en esta investigación no se tomó en cuenta esto y no se puede garantizar que las vigas se secaban uniformemente, de hecho lo más probable es que no era así principalmente si consideramos que todas las vigas se fallaron a una distinta edad de falla, dando posibilidad a un mayor secado en unas que en otras, lo cual podría haber afectado la cantidad de repeticiones de carga soportados por las vigas. Se recomienda generar un tiempo estándar de cuando hacer el ensayo luego de los 28 días de curado, esto porque los ensayos deben hacerse en seco porque las galgas no se pueden pegar si la viga está saturada.

La reproducción de un concreto de un proyecto real en laboratorio, resulta complejo. Se recomienda el muestreo de concreto para el uso de ensayos de fatiga y módulo dinámico con el fin de garantizar de una mejor manera la representatividad de los especímenes con el concreto colocado en campo, lo anterior se podría aplicar en futuros proyectos pero conlleva la coordinación de los muestreos entre la empresa constructora y el laboratorio o investigador, esto podría ayudar a calibrar cada vez mejor los modelos de fatiga para materiales costarricenses.

Los modelos de fatiga obtenidos son modelos a los que les falta incorporarles la incertidumbre de los parámetros y la confiabilidad de los mismos, por lo que estos modelos deben ser calibrados y mejorados, mediante más investigación y mediante el uso de correlaciones campo laboratorio. El desarrollo de metodologías mecanicistas incluye el uso de equipos de laboratorio modernos por lo que se recomienda el análisis de losas de concreto o incluso de estructuras completas de pavimentos rígidos con el Simulador de Vehículos Pesados (HVS) del LanammeUCR, ya que este equipo puede simular de una mejor manera las cargas cíclicas producidas en condiciones reales y puede servir para obtener alguna calibración inicial de los modelos de fatiga desarrollados a partir de fallas en vigas sometidas a flexión.

Por otro lado, es importante el monitoreo de las condiciones dadas en proyectos reales, se considera que el proyecto Cañas Liberia, pronto a concluirse e inaugurarse, es un buen proyecto dadas sus dimensiones e importancia, que debe seguir siendo monitoreado para revisar la calidad de las losas a lo largo del tiempo y revisar el pavimento en general, para poder concluir sobre la eficiencia de los métodos constructivos utilizados y mantener un

registro del agrietamiento observable, de la eficiencia de transferencia de carga entre losas, de la variación del índice internacional de regularidad, de la variación a lo largo del tiempo (estación seca y lluviosa) de las propiedades de las capas del pavimento mediante los métodos de retro cálculo de módulo, y todos aquellos parámetros que se puedan analizar para lograr mejorar el diseño inclinándose cada vez más a una práctica de diseño mecanicista y buscando una mejora en los métodos constructivos de los pavimentos rígidos en el país.

Se debe estudiar más a fondo las condiciones locales de los distintos parámetros que conlleva un diseño mecanicista, el cual incluye parámetros como el tráfico, las propiedades mecánicas de los materiales, las condiciones climáticas y la confiabilidad de los modelos desarrollados, se recomienda el uso de algún software para obtener las respuestas estructurales del pavimento, por ejemplo el software ApRIGID desarrollado por el LanammeUCR a partir de una investigación con el software ISLAB2000.

Se considera importante la creación de una base de datos con las condiciones climáticas típicas del país y sus diferentes regiones. Es importante considerar las variaciones del clima, principalmente si notamos como en nuestro país hay zonas con condiciones más críticas, tal como la zona atlántica que se ve fuertemente afectada por la humedad o la zona de Guanacaste en donde se presenta condiciones muy secas con altas temperaturas de día y bajas temperaturas de noche, así como el efecto de las precipitaciones que provocan variaciones en el nivel freático que podrían afectar las capas inferiores de los pavimentos llegando incluso a provocar bombeo. Todos estos temas deben ser analizados e implementados en las nuevas metodologías mecanicistas. Se recomienda la creación de una base de datos climáticos análoga a la del MEPDG, para así incluir en el diseño de pavimentos efectos climáticos como la temperatura, humedad y precipitación.

Se recomienda desarrollar un modelo de predicción de daño, que relacione los fenómenos de agrietamiento y ahuellamiento con el daño calculado y los daños observables a lo largo de la vida útil del pavimento (análogo al LTPP del MEPDG) y así poder monitorear distintos parámetros y correlacionar cuales son los que están influyendo en el agrietamiento de los pavimentos, para ello se debe crear una base de datos del comportamiento de los pavimentos a largo plazo.

VI. FUENTES DE INFORMACIÓN

- Aguas, P; Gómez, J y Sesma, J, (2002). *Mecánica de Materiales para Pavimentos*. Queretano: Instituto Mexicano del Transporte
- Aguilar, J y Loría, L (2006). *Infraestructura Vial*, [Versión electrónica]. *Desarrollo de modelos de fatiga para capas asfálticas*. Vol 8 (#15), 18-22.
- Austroroads (2012) *Preliminary Investigation of the Influence of Microcracking on Fatigue Life on Cemented Materials*. Sydney: Austroroads Ltd
- Boada, M y Reyes, F. *Comportamiento a la fatiga de una mezcla de concreto MR-3.5 MPa para pavimento con adición de fibras plásticas*. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Calo (2012) "Nueva Metodología para el Diseño de Pavimentos de Hormigón ACPA StreetPave" Extraído el 1 de marzo de: [http://pavimentosurbanos.icpa.org.ar/publico/2012-N04-Agosto%20-%20Art04%2020Nueva%20metodologia%20diseno%20ACPA%20Street Pave.Pdf](http://pavimentosurbanos.icpa.org.ar/publico/2012-N04-Agosto%20-%20Art04%2020Nueva%20metodologia%20diseno%20ACPA%20Street%20Pave.Pdf) [scribd.com/doc/44812933/diseño-de-pavimentos](https://www.scribd.com/doc/44812933/diseño-de-pavimentos)
- Calo, D (2012) "Diseño de pavimentos rígidos" Extraído el 8 de enero de 2016 de: <http://www.actualizarmiweb.com/sites/icpa/publico/files/01.pdf>
- Calo, D. (2012, marzo). *Diseño de Pavimentos Rígidos*. En: Jornadas de actualización técnica diseño y construcción de pavimentos de hormigón. San Salvador de Jujuy, Argentina.
- Camposano, J (2012) "4 Congreso Iberoamericano de pavimentos de concreto: El hormigón trabajando a tracción" Extraído el 18 de febrero de 2015 de: http://www.concretonline.com/pdf/00hormigon/art_tec/El_Hormigon_a%20traccion.pdf
- CEMEX (2013). *CEMEX suministra 150,000 toneladas de concreto hecho a la medida para proyecto de infraestructura vial más grande en Costa Rica*. Extraído el 25 de agosto de 2014, de: <http://www.cemex.com/ES/SalaDePrensa/Historia/Historia20131029.aspx>
- Cemex (2016) "Cementos" Extraído el 13 de enero de 2016 de: <http://www.cemexcostarica.com/SolucionesCanal/Cementos.aspx>
- Comité ACI 224 (2001) "Control de la Fisuración en Estructuras de Hormigón (ACI224R-01)" Extraído el 2 de mayo de 2016 de: http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/publicom/Control_de_la_fisuracion.pdf

- Cornejo, N y Velázquez, W (2009). *Análisis Comparativo entre Métodos de Diseño de Estructuras de Pavimento Rígido*. Trabajo Final de Graduación por el grado de Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, El Salvador.
- Diseño de Pavimentos (26 de junio de 2015). "Diseño de Pavimentos Basado en Teorías Mecánico-empíricas" Extraído el 4 de abril de 2016 de <http://documents.mx/documents/disenodepavimentos-558dd6b0b8a5d.html#>
- ERES Consultants; ARA, Inc. (2004). NCHRP Project 1-37A *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*, Final Report. Illinois: National Cooperative Highway Research Program.
- García, C (2012) "¿Resistencia a la flexión del concreto?" Extraído el 18 de febrero de 2015 de: <http://www.duravia.com.pe/blog/wp-content/uploads/Resistencia-Concreto-ACI-ICA-version-web.pdf>
- Gonzales, G (2013). "Costa Rica no tiene recursos suficientes para mantener sus carreteras en estado aceptable". El Financiero. Extraído el 23 de agosto de 2014, de: http://www.elfinancierocr.com/economia-y-politica/Infraestructura-calles-presupuesto_para_infraestructura-MOPT-CONAVI_0_288571151.html
- Holcim (2010) "Catálogo de productos". Extraído el 13 de octubre de 2015 de: http://www.holcim.cr/uploads/CR/Catalogo_Agregados.pdf
- Instron (2014) *Resistencia a la flexión de las vigas de hormigón (ASTM C78)*. Extraído el 5 de agosto de 2014, de <http://www.instron.com.es/wa/solutions/ASTM-C78-Flexural-Strength-Concrete-Beams.aspx>
- Koss, I (2001). *Concreto Reforzado con fibras de Polipropileno*. Trabajo Final de Graduación por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, Costa Rica.
- Mateos, Pérez, Cadavid y Marrón (2011) "Aplicación del método recursivo incremental CalME a la evaluación del estado estructural de los pavimentos" Extraído el 18 de febrero de 2015 de: http://ateb.es/images/pdf/Articulo_Ingenieria_Civil_Auscultacion_Estructural_de_Firmes.pdf

- Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) (2007). *Sección 15: Diseño estructural de pavimentos rígidos*. Extraído el 30 de agosto de 2014, de: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:SXfydtFs2YgJ:minvu.gob.cl/>
- Monge, S. (2013). *Evaluación del Comportamiento a la fatiga de una mezcla de Concreto MR-4,5MPa con adición de Fibras de Polipropileno*. Trabajo Final de Graduación por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, Costa Rica.
- Moreno, Pérez, Cadavid y Marrón, (2011) *Evaluación del estado estructural de los pavimentos*. Extraído el 22 de agosto de 2014, de http://ateb.es/images/pdf/Articulo_Ingenieria_Civil_Auscultacion_Estructural_de_Firmes.pdf
- Navas, A (2012). *"IC-0504 Materiales de Construcción"*. Universidad de Costa Rica
- Obando, Y (2013) *Carretera a San Ramón puede ser mejor y más barata*. Semanario universidad. Extraído el 25 de agosto de 2014, de <http://www.semanariouniversidad.ucr.cr/noticias/pais/11679-carretera-a-san-ramon-puede-ser-mejor-y-mas-barata.html>
- Pavement interactive (2009) *"Jointed Plain Concrete Pavement"* Extraído el 8 de enero de 2016 de: <http://www.pavementinteractive.org/article/pcc-pavement/>
- PITRA (2014) *"Consideraciones técnicas en relación con la especiación del IRI para el proyecto: Ampliación y rehabilitación de la ruta nacional N°.1, Carretera Interamericana Norte, sección Canas-Liberia"*. Extraído el 9 de enero de 2016 de: <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/images/productos-PITRA/Informes/2014/LM-PI-UMP-A-007.pdf>
- PITRA (2014) *"Nota Informe No. LM-IC-D-0340-14 Bacheos realizados en las losas de la Ruta 18, Limonal-Límite Cantonal Abangares-Cañas."* Extraído el 8 de enero de 2016 de: <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/images/productos-PITRA/Informes/2014/LM-IC-D-0340-14.pdf>
- Quirós, R (2015). *Desarrollo de modelos estadísticos para la determinación de respuestas mecánicas críticas en pavimentos rígidos*. Trabajo Final de Graduación por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, Costa Rica.

- Rao, S, y Roesler, J (2005). *Cumulative fatigue damage analysis of concrete pavement using accelerated pavement testing results*. Universidad de Illinois.
- Reyes, O; Pérez, F (2011) Ingeniería e investigación, [Versión electrónica]. *Estudio del comportamiento a fatiga de asfaltos mediante el uso del reómetro de corte dinámico*. Vol. 31, No 1 abril 2011 (47-55)
- Roesler, J (1998) "Fatigue of concrete beams and slabs" Extraído el 9 de marzo de 2015 de: http://www.researchgate.net/publication/234417730_Fatigue_of_concrete_beams_and_slabs
- Sandoval, L (2008) "*Estado del arte de la fatiga de la losa de concreto*" Extraído el 9 de marzo de 2015 de: http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/1_893/2/125984.pdf
- Serrano, R. (2006). *Estudio de fatiga de pavimentos rígidos, mediante determinación de la resistencia cíclica de probetas cilíndricas de hormigón cargadas transversalmente*. Tesis Final de Graduación por el grado de Ingeniero Civil en Obras Civiles, Escuela de Ingeniería Civil en Obras Civiles, Universidad Austral de Chile, Chile.
- UCL (2006) "*Calibración de los modelos gimph*" Extraído el 1 de marzo de 2015 de: http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:K89QqOxrmxcJ:https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2006/1/CI62G/1/material_docente/bajar%3Fid_material%2F125984&cd=12&hl=es&ct=clnk
- Unidad de Auditoría Técnica Externa, LanammeUCR. *Informe LM-AT-015B-15. Análisis de Evidencias: Ampliación y Rehabilitación de la Ruta Nacional No. 1, Carretera Interamericana Norte, Sección Cañas-Liberia*. San José, febrero de 2015
- Unidad de Auditoría Técnica, PITRA-LanammeUCR. "*Análisis de la calidad del material de préstamo, subbase y base Estabilizada. Periodo de muestreo: enero a marzo 2013 proyecto: Ampliación y Rehabilitación de la Ruta Nacional No. 1, Carretera Interamericana Norte, sección Cañas-Liberia. LPI No. 2011LI-000004-0DI00*", San José, Agosto de 2013.
- Unidad de Auditoría Técnica, PITRA-LanammeUCR. "*Análisis de la calidad del material de préstamo, subbase, base estabilizada y concreto del pavimento. Periodo de muestreo: abril a junio 2013. Proyecto: Ampliación y Rehabilitación de la Ruta Nacional No. 1,*

Carretera Interamericana Norte, sección Cañas-Liberia. LPI No. 2011LI-000004-0DI00, San José, Enero de 2014.

Unidad de Auditoria Técnica, PITRA-LanammeUCR. "Análisis general de la calidad del material de préstamo, subbase, base estabilizada y concreto del pavimento rígido. Periodo de muestreo: Año 2013 *Proyecto: Ampliación y Rehabilitación de la Ruta Nacional No. 1, Carretera Interamericana Norte, sección Cañas-Liberia. LPI No. 2011LI-000004-0DI00*", San José, Mayo de 2014.

Unidad de Auditoria Técnica, PITRA-LanammeUCR. "*Evaluación de la calidad de los materiales, la capacidad estructural y funcional de la losa de rodamiento y aspectos constructivos. Periodo de muestreo: Año 2014. Proyecto: Ampliación y Rehabilitación de la Ruta Nacional No. 1, Carretera Interamericana Norte, sección Cañas-Liberia. LPI No. 2011LI-000004-0DI00*", San José, Noviembre de 2015.

Vega, E (2012). *Elaboración de una guía de análisis estructural para pavimentos rígidos*. Trabajo Final de Graduación por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, Costa Rica.

Winter (2006) "Instrumentation and Calibration of Virginia's Smart Road" Extraído el 1 de marzo de 2015 de: "http://www.mrr.dot.state.mn.us/research/mnroad_project/index_files/pdfs/rao_s.pdf

Zanuy, C; Albajar, L y De la Fuente, P (2011). Materiales de Construcción, [Versión electrónica]. *El proceso de fatiga del hormigón y su influencia estructural*. Vol. 61, 303, 385-399 <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt258.pdf>

VII. ANEXOS

Anexo A. Hoja técnica de Agregados y cemento Holcim

Arena 4.8 mm Guápiles

(Arena Industrial C-144, Código 10018552)

Descripción

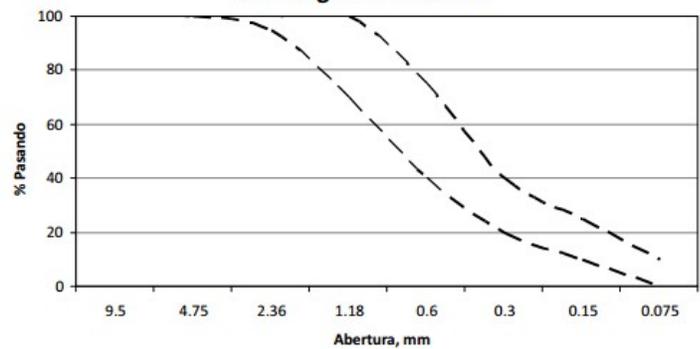
Es una arena manufacturada, producida en planta Guápiles, que se obtiene a partir de un proceso de extracción, trituración y cribado, de material de río. Adicionalmente es cribada a un diámetro máximo de 4.8 mm, para lograr el cumplimiento de las especificaciones ASTM C 144 y CSCR 2002, en lo que se refiere a arenas producción de morteros para mampostería. Se puede utilizar directamente en morteros de pega y repello, ya que su graduación evita el cribado y desperdicio. Litología: Aluvión, compuesto por material volcánico.

Datos técnicos

Análisis granulométrico

Malla		Límite	
pulg.	mm	Inferior (%)	Superior (%)
3/8"	9.5	100	100
N° 4	4.75	80	100
N° 8	2.36	60	100
N° 16	1.18	40	85
N° 30	0.6	20	60
N° 50	0.3	10	45
N° 100	0.15	-	30
N° 200	0.075	-	18.0

Límites granulométricos



Propiedades físicas

Propiedad	INTE	(ASTM)	Unidad	Requisito
Humedad evaporable		C-566	%	< 14
Pérdida por lavado N°200	06-02-12-08	C-117	%	< 10
Modulo de f inura	06-02-09-07	C-136		<2.2=MF<2.6
Peso específico	06-02-34-10	C-128		> 2.45
Absorción	06-02-34-10	C-128	%	< 3.5
Peso unitario	06-02-21-08	C-29	Kg/m³	> 1200
Colorimetría	06-02-22-09	C-40		< 3
Sanidad	06-02-24-09	C-88	%	< 12%

Dosificaciones de mezcla de concreto revenimiento máximo 10 cm

Tipo mortero	Cemento Holcim UG28	Arena 4.8 mm Industrial C144 Guápiles	Cal	Agua, cubetas 19 litros
Pega A	1	3	0.25	2.75
Pega B	1	4	0.5	3.25
Repello pingue	1	4	0	
Repello relleno	1	6	0	

Dado que el CETEC de Holcim (Costa Rica) S.A. ® no puede controlar el uso final de estas recomendaciones, no existe garantía expresa ni implícita sobre el uso o el rendimiento de las mismas en cualquier circunstancia determinada. Las personas que reciben esta información deberán llevar a cabo sus propias pruebas para determinar si cumple con sus necesidades de uso particular.

Aplicaciones

Recomendada para morteros y repellos de mampostería, losas de nivelación, juntas de elementos prefabricados, y toda obra o elemento en donde la graduación y tamaño máximo del mortero, requieran especial cuidado.

Ventajas

Por su graduación, peso y baja absorción permite la fabricación de morteros con una mayor densidad, logrando una mayor eficiencia en el consumo de cemento, reducción de grietas y contracciones.

Se ofrece también la presentación en sacos de 40 Kg, facilitando su manipulación en obras y sitios donde las condiciones de acceso y almacenamiento no permiten su manejo a convencional. Ideal para obras menores, en donde se puede lograr un mejor control de la dosificación y desperdicio de los materiales.

Piedra 19 mm Guápiles

(Gravilla, Código 10015155)

Descripción

Es un material granular, obtenida a partir de un proceso de cribado y lavado de material de río, garantizando el control de sus tamaños máximo y mínimo, 19-6.25 mm. Por su condición de producción presenta 100% de caras redondas, y esta libre de limos y arcillas.

Litología: Aluvión, compuesto por material volcánico.

Aplicaciones

Recomendada para construcción de filtros, lechos de drenaje, y cualquier aplicación de concreto, en donde la forma y factor de caras fracturadas no sean requisitos a cumplir.

Ventajas

Adecuado control de tamaños, máximo y mínimo, libre de limos, arcillas y otros materiales finos. Económico y de alta disponibilidad en planta.

Especificaciones técnicas

Tabla 1a: Requerimientos físicos del cemento Holcim tipo MP

Fuente: Reporte del laboratorio de Holcim.
*Valor de referencia;
**Valor estimado. Dato a 3 meses 0,00%.
*** Análisis solo para cementos Portland sin adiciones. Para cementos puzolánicos se emplea la ASTM C1012 indicada previamente.

		Cemento Holcim tipo MP-AR	RTCR 383:2004 MP	ASTM C150 TIPO II	ASTM C595 IP(MS)	ASTM C1157 MS
Superficie específica, ASTM C204	(min. m ² /kg)	330	-	260	-	-
	(min. cm ² /g)	3300*		-	-	-
Finura en malla 0.045 mm (No. 325), ASTM C 430	Pasante (min. %)	97,5	-	-	-	-
	Retenido (máx. %)	3,5*	-	-	-	-
Cambio en longitud – autoclave, ASTM C 151	Expansión (máx. %)	0,20	0,80	0,80	0,80	0,80
	Contracción (máx. %)	0,20*		-	0,20	
Fragua Vicat ASTM C191	inicial (min. minutos)	45	45	45	45	45
	final (máx., minutos)	375	420	375	420	420
Contenido de aire en el volumen del mortero, ASTM C185, (máx. %)		12	12	12	12	12
Resistencia a la compresión, ASTM C109 (min. MPa)	1 día	12,0	10	10,0	-	-
	3 días	20,0	17	17,0	11,0	11,0
	7 días	25,0	-	-	18,0	18,0
	28 días	35,0	-	28,0	25,0	28,0
Calor de hidratación, ASTM C 186 (máx. kJ/kg)	7 días	290	-	290	290	-
	28 días	330	-	-	330	-
Expansión del mortero, ASTM C227	14 días (máx. %)	0,02	0,02	-	0,020	0,020
	56 días (máx. %)	0,06	-	-	0,060	0,060
Expansión del mortero, ASTM C1012**	6 meses (máx. %)	0,05	-	-	0,05	0,05
	1 año (máx. %)	0,10	-	-	0,10	0,10
Resistencia a los sulfatos, 14 días C452, (máx. % expansión)		-	-	0,040***	-	-

Anexo B. Caracterización de los materiales (mezcla1)

Cuadro 33. Granulometría del agregado fino para la mezcla 1.

Tamiz	Peso retenido (g)	% retenido	% retenido acumulado	% que pasa	Límite inferior	Límite superior
"3/8"					100	100
No 4	66	3,6	3,6	96,4	95	100
No 8	303,8	16,8	20,4	79,6	80	100
No 16	377,8	20,9	41,3	58,7	50	85
No 30	404,1	22,3	63,6	36,4	25	60
No 50	347,9	19,2	82,8	17,2	10	30
No 100	200,4	11,1	93,9	6,1	2	10
No 200	62,5	3,5	97,3	2,7	0	2
Charola	47,3	2,6	100,0	0,0	MF	3,06
Suma	1809,8	100,0			Material <75µm	2,61%

Cuadro 34. Granulometría del agregado grueso para la mezcla 1

Tamiz	Peso retenido (g)	% retenido	% retenido acumulado	% que pasa
"1 1/2"	0	0,0	0,0	100,0
1	0	0,0	0,0	100,0
"3/4"	144,3	1,8	1,8	98,2
"1/2"	4872,7	62,0	63,8	36,2
"3/8"	2552,5	32,5	96,3	3,7
4	253,9	3,2	99,56	0,4
8	2,1	0,0	99,59	0,4
Charola	17	0,2	99,8	0,2
Suma	7842,5	100		

Cuadro 35. Propiedades de los agregados para la mezcla 1

Propiedad		Fino	Grueso
Densidad relativa aparente	Gs	2,71	2,76
Densidad relativa saturada superficie seca	Gbss	2,47	2,69
Densidad relativa seca	Gbs	2,32	2,65
Porcentaje de absorción	%D	6,22	1,46
Densidad aparente	Ds	2700,8	2753,1
Densidad saturada superficie seca	Dbss	2461,6	2683,3
Densidad seca	Dbss	2312,1	2643,4

Cuadro 36. Propiedades del cemento Holcim

Consistencia Normal		
Agua	27,2	%
Tiempo de Fragua		
Inicial	135	Min
Final	210	Min
Gravedad Especifica		
Gs	3,1	
Resistencia a la compresión (kg/cm²)		
Resultados a 7 días	166, 6	Promedio: 195,2
	205, 2	
	213, 9	
Resultados a 28 días	313, 7	Promedio: 319,7
	329, 4	
	296, 3	
	300, 8	
	346, 5	
	331, 6	

Anexo C. Diseño de mezcla1 (Cemento Holcim MP-AR y agregados Holcim)

Cuadro 37. Diseño de mezcla 1

F'c (kg/cm³)	350	W de dosificación AG (%)	1,77
Numero de muestras disponibles	0	Absorción AG (%)	1,47
Desviación estándar (con factor de modificación)	1,16	Gbs AG	2,66
Indique revenimiento máximo recomendado (ACI 211-91) (mm)	100	Peso seco AG(kg)	999,9
Dimensión menor del elemento (mm)	100	Peso unitario suelto AG(kg/m ³)	1364,6
Espesor de losas (mm)	150	Humedad asociada a peso unitario suelto AG (%)	0
Tamaño máximo AG(mm)	20	Volumen bruto AG	0,342
Tamaño máximo nominal	19	Gbs arena	2,33
Indicar si se incluye incluso de aire ("si" o "no")	No	Volumen bruto de la arena (m ³)	0,26
Tipo exposición total de aire (L:leve, M: moderada, E: extrema)	E	Peso seco arena (kg)	596
Contenido aire %	2,0	W de dosificación de la arena(%)	9,38
Contenido agua (KG/m³)	205	Absorción de la arena (%)	6,22
F'cr :	435	Hinchamiento de arena en la dosificación (%)	0
Indica w/c requerido por condiciones severas	0,45	Peso unitario suelto arena (Kg)	1428,7
Relación agua cemento:	0,38	Humedad asociada peso unitario suelto arena(%)	0
Indique Gs:	3,1	Hinchamiento de arena asociado a peso unitario suelto (%)	0
Peso cemento (Kg):	544	Peso de agua corregido (Kg)	183,1
Volumen solido(m³):	0,177	Peso corregido arena (Kg)	652,1
Peso unitario del cemento (kg/m³)	1100	Peso corregido piedra (kg)	1017,6
Volumen masivo cemento (m³)	0,495	Volumen dosificación Arena (kg)	0,417
Indique el modulo de finura del AF:	3,1	Volumen dosificación AG (kg)	0,733
Volumen envarillado de AG (m³)	0,594 3	Dosificación por peso (kg/m³)	
Indicar corrección de volumen Ag(*)	10	Cemento	544,2
Volumen envarillado de AG (m ³) (corregido)	0,653 73	Arena	652,1
Peso unitario envarillado(kg/m³)	1530	Piedra	1017,6
Humedad asociada al peso unitario envarillado (%)	0	Agua	183,1
		a/c	0,34

Anexo D Caracterización de los materiales Mezcla II

Cuadro 38. Granulometría del agregado fino para la mezcla 2

Tamiz	Peso retenido (g)	% retenido	% retenido acumulado	% que pasa	Límite inferior	Límite superior
"3/8"					100	100
No 4	44	2,2	2,2	97,8	95	100
No 8	271	13,5	15,7	84,3	80	100
No 16	166	8,3	24,0	76,0	50	85
No 30	650,4	32,5	56,6	43,4	25	60
No 50	418,9	20,9	77,5	22,5	10	30
No 100	239	11,9	89,5	10,5	2	10
No 200	74,8	3,7	93,2	6,8	0	2
Charola	136	6,8	100,0	0,0	MF	2,5
Suma	2000	100,0			Material <75µm	2,80%

Cuadro 39. Granulometría del agregado grueso para la mezcla 2

Tamiz	Peso retenido (g)	% retenido	% retenido acumulado	% que pasa	Especificación % que pasa
"1 1/2"	0	0,0	0,0	100,0	100-100
1	0	0,0	0,0	100,0	90-100
"3/4"	1249,5	25,0	25,0	75,0	40-85
"1/2"	2681,8	53,6	78,6	21,4	1-25
"3/8"	604,2	12,1	90,7	9,3	0-10
4	86,9	1,7	92,43	7,6	0-5
Charola	7,4	0,1	92,58	7,4	0- 1.1
Suma	4629,8	93			-

Cuadro 40. Propiedades de los agregados para la mezcla 2

Propiedad	Fino	Grueso
Densidad relativa aparente	Gs 2,74	2,75
Densidad relativa saturada superficie seca	Gbss 2,58	2,66
Densidad relativa seca	Gbs 2,49	2,61
Porcentaje de absorción	%D 3,67	1,63
Densidad aparente	Ds 2729,8	2743,1
Densidad saturada superficie seca	Dbss 2570,5	2653,4
Densidad seca	Dbss 2480,8	2603,5

Cuadro 41. Propiedades del cemento Cemex

Consistencia Normal		
Agua	28,0	%
Tiempo de Fragua		
Inicial	120	Min
Final	225	Min
Gravedad Especifica		
Gs	2,96	
Resistencia a la compresión (kg/cm²)		
Resultados a 28 días	272,0	Promedio: 282,8
	274,9	
	296,1	
	300,6	
	308,9	
	244,3	

Anexo E. Hoja técnica del aditivo para redosificación de concreto utilizado en la mezcla 2

Descripción

POLYHEED 995 es un aditivo reductor de agua de alto rango listo para usarse. Es muy efectivo en la producción de concreto con diferentes niveles de manejabilidad para aplicaciones tales como el bombeo y superficies planas y que requieran acabados más refinados.

POLYHEED 995 cumple con los requisitos de la norma ASTM C494 para aditivos retardantes Tipo A, D y Tipo G.

Usos Recomendados

POLYHEED 995 se recomienda en todo concreto donde se quiera alta plasticidad y extender el fraguado, especialmente en climas cálidos. POLYHEED 995 es un aditivo que modifica la hidratación del cemento.

POLYHEED 995 puede ser utilizado en concretos para estructuras marinas sujetas a ambientes agresivos o expuestas a cloruros o sulfatos. Por lo tanto puede ser utilizado en concretos de baja permeabilidad y durables.

POLYHEED® 995

Aditivo reductor de agua, alto rango, y modificador de la hidratación del cemento

Características y Beneficios

POLYHEED 995 ayuda a la producción de un concreto de calidad proporcionando las siguientes ventajas especiales:

- Concreto con alta fluidez por periodos prolongados.
- Trabajabilidad y bombeabilidad superior
- Fraguado retardado y mayor tiempo para manejar la mezcla.
- Mejora considerablemente las propiedades del concreto recién colocado y fraguado
- Concreto con una resistencia final alta
- Concreto más impermeable y durable
- Fácil de transportar por largas distancias

POLYHEED 995 resulta efectivo ya sea como un aditivo único o como parte de un sistema de aditivos de BASF Construction Chemicals.

Indicaciones de Uso

Dosificación

POLYHEED 995 se recomienda en un rango de 3 a 10 ml por cada Kg de cemento, en la mayoría de las mezclas de concreto. BASF Construction Chemicals no recomienda usar dosificaciones fuera del rango establecido sin antes realizar pruebas de campo. Consulte a su representante local de BASF para determinar el rango de dosificación óptimo.

Sin cloruros, sin corrosión

POLYHEED 995 no contiene cloruro de calcio añadido ni algún otro agente químico que contenga cloruros, por lo tanto no provoca la corrosión del acero de refuerzo del concreto.

Recomendaciones de uso

Compatibilidad

POLYHEED 995 no contiene cloruro de calcio añadido ni algún otro agente químico que contenga cloruros, por lo tanto no provoca la corrosión del acero de refuerzo del concreto.

Nota

La aplicación adecuada del producto es responsabilidad del usuario. Toda visita de campo realizada por el personal de BASF tiene como fin único el hacer recomendaciones técnicas y no el supervisar o proporcionar control de calidad en el lugar de la obra.

Almacenamiento

Vida útil: La vida útil de POLYHEED 995 es de 12 meses como mínimo, si se mantiene en su envase original cerrado y almacenado en un sitio fresco y seco.

Evite almacenar el producto a la exposición directa de los rayos solares y altas temperaturas.

Empaque

POLYHEED 995 se suministra en totes de 1040 L y a granel

Seguridad

Consulte la Hoja de Datos de Seguridad (MSDS) para este producto.

Anexo F Caracterización de los materiales Mezcla 3

Cuadro 42. Granulometría del agregado fino para la mezcla 3

Tamiz	Peso retenido (g)	% retenido	% retenido acumulado	% que pasa	Especificación % que pasa
"3/8"					100
No 4	92,7	4,7	4,7	95,3	95-100
No 8	398,3	20,2	25,0	75,0	80-100
No 16	399,1	20,3	45,2	54,8	50-85
No 30	378,9	19,3	64,5	35,5	25-60
No 50	227,8	11,6	76,1	23,9	10-30
No 100	192	9,8	85,8	14,2	2-10
No 200	92,7	4,7	90,5	9,5	0-2
Charola	84,5	4,29	94,8	5,2	
Suma	1866	94,8			
MF	3,01				

Cuadro 43. Granulometría del agregado grueso para la mezcla 3

Tamiz	Peso retenido (g)	% retenido	% retenido acumulado	% que pasa	Especificación % que pasa
"1 1/2"	0	0,0	0,0	100,0	100-100
1	0	0,0	0,0	100,0	100
"3/4"	275,2	5,6	5,6	94,4	95-100
"1/2"	2053	42,0	47,6	52,4	25-60
"3/8"	1240	25,3	72,9	27,1	25-60
4	1288,2	26,3	99,24	0,8	0-10
Charola	37,1	0,8	100,00	0,0	0- 1.1

Cuadro 44. Propiedades de los agregados para la mezcla 3

Propiedad	Fino	Grueso
Densidad relativa aparente	Gs 2,79	2,69
Densidad relativa saturada superficie seca	Gbss 2,66	2,63
Densidad relativa seca	Gbs 2,60	2,59
Porcentaje de absorción	%D 2,65	1,40
Densidad aparente	Ds 2779,7	2683,3
Densidad saturada superficie seca	Dbss 2650,2	2623,4
Densidad seca	Dbss 2590,4	2583,5

Hoja Técnica
Edición 2309201501
Plastocrete® 935 CR

Plastocrete® 935 CR

Aditivo reductor de agua-plastificante y retardante controlado de fraguado.

Descripción	Aditivo líquido reductor de agua, plastificante y retardante controlado de fraguado para concreto. Cumple con la norma ASTM C 494 Tipo D .						
Usos	Plastocrete® 935 CR se utiliza en la elaboración de concretos convencionales y en general para todo tipo de estructuras de concreto, especialmente diseñado para climas extremos y prolongados tiempos de transporte. Buena compatibilidad con cementos compuestos.						
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> ■ Aumenta la trabajabilidad y plasticidad del concreto. ■ Permite reducir hasta el 10% del agua de mezclado. ■ Permite el transporte del concreto a largas distancias o por tiempos prolongados. ■ Permite tener retardos de fraguado controlados. 						
Modo de Empleo	Agregue Plastocrete® 935 CR junto con el agua de mezcla durante la preparación del concreto.						
Dosificación	De 0,4% a 1,0% del peso del cemento (3,0 a 8,0 ml/kg de cemento).						
Datos Técnicos	<table border="0"> <tr> <td>Tipo:</td> <td>Aditivo líquido a base de lignosulfonato modificado.</td> </tr> <tr> <td>Color:</td> <td>Café oscuro.</td> </tr> <tr> <td>Densidad:</td> <td>1,24 kg/l aprox.</td> </tr> </table>	Tipo:	Aditivo líquido a base de lignosulfonato modificado.	Color:	Café oscuro.	Densidad:	1,24 kg/l aprox.
Tipo:	Aditivo líquido a base de lignosulfonato modificado.						
Color:	Café oscuro.						
Densidad:	1,24 kg/l aprox.						
Precauciones	La dosis óptima se debe determinar mediante ensayos con los materiales y las condiciones de la obra.						
Medidas de Seguridad	En caso de contacto con la piel, lave la zona afectada inmediatamente con abundante agua y jabón. En caso de contacto con los ojos, lave enseguida con agua abundante durante 15 minutos y acuda al médico. En caso de ingestión no provoque el vómito y solicite atención médica. Para mayor información y en caso de derrames consulte la hoja de seguridad.						
Almacenamiento	Doce (12) meses en su envase original bien cerrado, bajo techo, en un lugar fresco y seco						



Anexo H Ficha técnica del aditivo Sikament 195 CR utilizado en la mezcla 3.

Hoja Técnica
Edición 2309201501
Sikament® -195 CR

Construcción

Sikament®-195 CR

Aditivo reductor de agua de rango medio-plastificante con exclusión de aire.

Descripción	Aditivo líquido, reductor de agua de rango medio, plastificante con exclusión de aire para concreto. No contiene cloruros. Cumple con la norma ASTM C 494 Tipo A y ASTM C 1017 Tipo II.
Usos	Sikament®-195 CR se utiliza en la elaboración de concretos para todo tipo de estructuras, especialmente diseñado para emplearse como reductor de agua, plastificante o fluidificante con sólo variar la dosificación. Permite tener concretos con baja inclusión de aire.
Ventajas	<ul style="list-style-type: none">■ Aumenta las resistencias mecánicas.■ Permite acabados superficiales de alta calidad.■ Permite una mayor adherencia al acero de refuerzo.■ Reduce la permeabilidad.■ Se puede re-dosificar en obra para facilitar la colocación y/o bombeo del concreto sin afectar de manera importante los tiempos de fraguado.
Modo de Empleo	<p>Como plastificante Agregue Sikament®-195 CR al concreto ya mezclado, en este caso debe ampliarse el tiempo de mezclado medio minuto por cada metro cúbico de concreto.</p> <p>Como reductor de agua Agregue Sikament®-195 CR junto con el agua de mezcla durante la preparación del concreto.</p>
Dosificación	<p>Como plastificante (ASTM C 1017 Tipo II) De 0.4% a 0.7% del peso del cemento (3.0 a 6.0 ml/kg de cemento)</p> <p>Como reductor de agua (ASTM C 494 Tipo A) De 0.4% a 0.7% del peso del cemento (3.0 a 6.0 ml/kg de cemento)</p>
Datos Técnicos	<p>Tipo: Aditivo Líquido. Color: Café Oscuro. Densidad: 1,21 kg / L Aprox.</p>
Precauciones	<p>La dosis óptima se debe determinar mediante ensayos con los materiales y las condiciones de la obra.</p> <p>Cuando se empleen re-dosificaciones del aditivo antes de colocar o bombear el concreto, la dosis total (primera y segunda dosis) no deberá exceder de 1,2% del peso del cemento (10,0 ml/kg de cemento).</p>

