

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**DESARROLLO DE MODELOS DE AGRIETAMIENTO POR FATIGA
PARA EL CONCRETO ASFÁLTICO EN COSTA RICA**

Proyecto de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería Civil

Pablo Chavarría Salas

Septiembre 2005

Tribunal Examinador

Ing. Pedro Castro Fernández. MSCE, MBA
Director

Ing. Aníbal Sanabria
Asesor

Ing. Orlando Dobles
Asesor

Chavarría Salas, Pablo

DESARROLLO DE MODELOS DE AGRIETAMIENTO POR FATIGA PARA EL CONCRETO ASFÁLTICO EN COSTA RICA

Proyecto de Graduación – Ingeniería Civil – San José, C.R.:

P. Chavarría S., 2005

137 h: ils. – 13 refs.

RESUMEN

La finalidad del presente estudio es desarrollar Modelos de Agrietamiento por Fatiga para el Concreto Asfáltico de Costa Rica para así determinar la capacidad de resistir fatiga de mezclas asfálticas representativas de la pavimentación nacional. Se evaluaron tres fuentes de agregados: Belén, Guápiles y Las Cónnavas; tres tipos de asfaltos: PG70, AC30 y AC30 modificado con SBS.

La evaluación de las mezclas asfálticas se hace por medio de ensayos de flexo-tracción bajo diferentes niveles de deformación unitaria. Los resultados obtenidos son los ciclos de carga a los cuales la mezcla sufre agrietamiento por fatiga. Los resultados se analizan mediante análisis estadísticos como análisis de varianza, pruebas de hipótesis y regresión multivariable, de las cuales se concluye que las mezclas con mejor desempeño a fatiga son las que poseen agregado de Las Cónnavas y asfalto AC30 modificado. Además que modelos generados en este estudio no muestran diferencias con modelos internacionales.

Conceptos claves: modelo de agrietamiento por fatiga; ensayos de flexo-tracción; desempeño.

Director del Proyecto: Ing. Pedro Castro Fernández.

MBA. MSCE. Candidato a Ph.D.

Escuela de Ingeniería Civil.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por llenarme de bendiciones y permitirme concluir con éxito este nuevo logro.

A mis padres, por su apoyo y por ser mi ejemplo a seguir

A mis hermanos: Paola, Fabricio y Melissa; y mi abuelita Cidely por su apoyo y la ayuda que me brindaron en todo momento.

Al Ing. Pedro Castro y al Tribunal Examinador por su tiempo y colaboración a lo largo de la investigación.

A Mario, Navarro y Piedra; con los cuales comparto muchos recuerdos inolvidables, además me brindaron su ayuda; gracias por su amistad.

Al personal del LANAMME por su interés y colaboración en este proyecto.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	11
I. Justificación	11
II. Importancia	12
III. Antecedentes	13
IV. Objetivo General	15
V. Objetivos Específicos	15
VI. Alcances y Limitaciones	16
VII. Metodología Experimental	17
Marco Teórico	20
1.1. Mezcla Asfáltica	20
1.1.1. Propiedades Volumétricas	21
1.1.1.1. Vacíos de aire	21
1.1.1.2. Asfalto Efectivo	21
1.1.1.2. Asfalto Efectivo	21
1.1.1.3. Asfalto Absorbido	21
1.1.1.4. Vacíos en el agregado mineral (VAM)	21
1.1.1.5. Vacíos llenos con asfalto (VFA)	22
1.1.2. Propiedades Físicas	22
1.1.2.1. Estabilidad	22
1.1.2.2. Durabilidad	22
1.1.2.3. Trabajabilidad	23
1.1.2.3. Trabajabilidad	23
1.2. Tipos de Mezclas Asfálticas	23
1.2.1. Mezclas asfálticas de granulometría densa (DGM)	23
1.2.2. Mezcla de granulometría discontinua (SMA Matriz de Agregado Grueso)	24
1.2.3. Mezclas de granulometría abierta (OGFC)	24
PROPIEDADES DE MATERIA PRIMA	25
2.1. Agregado	25
2.1.1. Características de los agregados	25
2.1.1.1. Gravedad Específica del Agregado Grueso y Fino	25
2.1.1.2. Angularidad del Agregado Grueso y Agregado Fino	26
2.1.1.3. Partículas planas y elongadas	27
2.1.1.4. Abrasión en máquina de Los Ángeles	28
2.1.1.6. Resumen de propiedades	28
2.1.2. Graduación	29
2.2. Ligantes Asfálticos	32
2.2.1. Procedimientos de envejecimiento de los ligantes asfálticos	33
2.2.1.1. Horno Rotatorio de película delgada (RFTO)	33
2.2.1.2. Cámara de Envejecimiento por presión (PAV)	33
2.2.2. Ensayos físicos y reológicos	34
2.2.2.1. Viscosímetro Rotacional (RV)	34
2.2.2.2. Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	34

2.2.2.3. Reómetro de vigas a flexión (BBR)	34
2.2.2.4. Ensayo de Tracción Directa (DTT)	34
2.2.3. Características de los Ligantes Asfálticos	35
2.3. Aditivos	36
2.3.1. Relleno Mineral	37
2.3.2. Fibras de celulosa	37
2.3.3. Elastómeros	37
MEZCLAS ASFÁLTICAS	38
3.1. Elaboración de la mezcla asfáltica	38
3.2. Compactación de la mezcla asfáltica	40
3.3. Elaboración de especímenes para el ensayo de fatiga	42
3.4. Propiedades volumétricas de mezclas asfálticas	43
RESISTENCIA AL AGRIETAMIENTO POR FATIGA	45
4.1. Definición	45
4.1.1. Factores que afectan la capacidad a fatiga de la mezcla asfáltica	46
4.1.1.1. Ligante asfáltico	46
4.1.1.2. Contenido de vacíos	47
4.1.1.3. Vacíos llenos con asfalto	47
4.1.1.4. Película de asfalto entre agregados	47
4.2. Método de Ensayo a Fatiga	48
4.3. Resultados de los Ensayos de Fatiga	51
DESARROLLO DE MODELOS DE FALLA POR FATIGA	59
5.1. Correlación de propiedades físico-mecánicas y la resistencia a la fatiga	59
5.2. Modelos de Regresión	63
5.3. Modelos de Agrietamiento por Fatiga	65
5.4. Modelación mecanística	66
CONCLUSIONES	79
BIBLIOGRAFÍA	83
ANEXOS	85
A.1. Anexo 1	85
A.2. Anexo 2	88
A.3. Anexo 3	136

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Gravedades específicas y porcentajes de absorción	26
Tabla 2.2. Porcentaje de caras fracturadas y angularidad	27
Tabla 2.3. Requerimientos Superpave para angularidad del agregado	27
Tabla 2.4. Partículas planas y elongadas	28
Tabla 2.5. Porcentaje de Abrasión en la Máquina de Los Ángeles	28
Tabla 2.6. Resumen de propiedades	29
Tabla 2.7. Granulometrías Densas usadas en este proyecto	30
Tabla 2.8. Granulometrías Discontinuas (SMA) usadas en este proyecto	31
Tabla 2.9. Propiedades físicas de los ligantes asfálticos	35
Tabla 2.10. Susceptibilidad térmica y al envejecimiento de los ligantes asfálticos	35
Tabla 2.11. Grado de desempeño de los Ligantes Asfálticos	36
Tabla 3.1. Temperaturas de mezclado y compactación	38
Tabla 3.2. Porcentajes óptimos de ligante asfáltico	39
Tabla 3.3. Propiedades volumétrica meta	43
Tabla 3.4. Propiedades volumétricas de las mezclas asfálticas	43
Tabla 4.1. Tratamientos experimentales	52
Tabla 4.2. Resultados de deformación unitaria crítica en las capas asfálticas de superficie	54
Tabla 4.3. Resultados del ensayo de fatiga para Agregado de Belén	55
Tabla 4.4. Resultados del ensayo de fatiga para Agregado de Guápiles	56
Tabla 4.5. Resultados del ensayo de fatiga para Agregado de Las Cóncavas	57
Tabla 5.1. Variables significativas	61
Tabla 5.2. Diferencias significativas entre distintas combinaciones de factores experimentales	62
Tabla 5.3. Información de modelo de regresión para todas las mezclas	63
Tabla 5.4. Información de modelo de regresión para mezclas densas	64
Tabla 5.5. Información de modelo de regresión para mezclas SMA	64
Tabla 5.6. Predicción de los modelos de agrietamiento por fatiga	67
Tabla 5.7. Ecuaciones de ajuste	78
Tabla 5.8. Factores de ajuste y coeficientes de correlación	78
Tabla A.1. Granulometría Densa de Belén	85
Tabla A.2. Granulometría SMA de Belén	85
Tabla A.3. Granulometría Densa de Guápiles	86
Tabla A.4. Granulometría SMA de Guápiles	86
Tabla A.5. Granulometría Densa de Las Cóncavas	87
Tabla A.6. Granulometría SMA de Las Cóncavas	87
Tabla A.7. Bloque Belén-DGM-AC30+SBS-1	88
Tabla A.8. Vigas Belén-DGM-AC30+SBS-1	89
Tabla A.9. Bloque Belén-DGM-AC30+SBS-2	90
Tabla A.10. Vigas Belén-DGM-AC30+SBS-2	91
Tabla A.11. Bloque Belén-DGM-AC30-1	92
Tabla A.12. Vigas Belén-DGM-AC30-1	93

Tabla A.13. Bloque Belén-DGM-AC30-2	94
Tabla A.14. Vigas Belén-DGM-AC30-2	95
Tabla A.15. Bloque Belén-SMA-AC30-1	96
Tabla A.16. Vigas Belén-SMA-AC30-1	97
Tabla A.17. Bloque Belén-SMA-AC30-2	98
Tabla A.18. Vigas Belén-SMA-AC30-2	99
Tabla A.19. Bloque Belén-SMA-PG70-1	100
Tabla A.20. Vigas Belén-SMA-PG70-1	101
Tabla A.21. Bloque Belén-SMA-PG70-2	102
Tabla A.22. Vigas Belén-SMA-PG70-2	103
Tabla A.23. Bloque Guápiles-DGM-AC30+SBS-1	104
Tabla A.24. Vigas Guápiles-DGM-AC30+SBS-1	105
Tabla A.25. Bloque Guápiles-DGM-AC30+SBS-2	106
Tabla A.26. Vigas Guápiles-DGM-AC30+SBS-2	107
Tabla A.27. Bloque Guápiles-DGM-AC30-1	108
Tabla A.28. Vigas Guápiles-DGM-AC30-1	109
Tabla A.29. Bloque Guápiles-DGM-AC30-2	110
Tabla A.30. Viga Guápiles-DGM-AC30-2	111
Tabla A.31. Bloque Guápiles-SMA-AC30-1	112
Tabla A.32. Vigas Guápiles-SMA-AC30-1	113
Tabla A.33. Bloque Guápiles-SMA-AC30-2	114
Tabla A.34. Vigas Guápiles-SMA-AC30-2	115
Tabla A.35. Bloque Guápiles-SMA-PG70-1	116
Tabla A.36. Vigas Guápiles-SMA-PG70-1	117
Tabla A.37. Bloque Guápiles-SMA-PG70-2	118
Tabla A.38. Vigas Guápiles-SMA-PG70-2	119
Tabla A.39. Bloque Las Cóncavas-DGM-AC30+SBS-1	120
Tabla A.40. Vigas Las Cóncavas-DGM-AC30+SBS-1	121
Tabla A.41. Bloque Las Cóncavas-DGM-AC30+SBS-2	122
Tabla A.42. Vigas Las Cóncavas-DGM-AC30+SBS-2	123
Tabla A.43. Bloque Las Cóncavas-DGM-AC30-1	124
Tabla A.44. Vigas Las Cóncavas-DGM-AC30-1	125
Tabla A.45. Bloque Las Cóncavas-DGM-AC30-2	126
Tabla A.46. Vigas Las Cóncavas-DGM-AC30-2	127
Tabla A.47. Bloque Las Cóncavas-SMA-AC30-1	128
Tabla A.48. Vigas Las Cóncavas-SMA-AC30-1	129
Tabla A.49. Bloque Las Cóncavas-SMA-AC30-2	130
Tabla A.50. Vigas Las Cóncavas-SMA-AC30-2	131
Tabla A.51. Bloque Las Cóncavas-SMA-PG70-1	132
Tabla A.52. Vigas Las Cóncavas-SMA-PG70-1	133
Tabla A.53. Bloque Las Cóncavas-SMA-PG70-2	134
Tabla A.54. Vigas Las Cóncavas-SMA-PG70-2	135
Tabla A.55. Observaciones analizadas estadísticamente	136
Tabla A.56. Variables Analizadas	137
Tabla A.57. Resultados estadísticos	137
Tabla A.58. Análisis de varianza de todas las mezclas	137
Tabla A.59. Parámetros estimados para todas las mezclas	138

Tabla A.60. Análisis de varianza para mezclas densas	138
Tabla A.61. Parámetros estimados para las mezclas densas	138
Tabla A.62. Análisis de varianza para mezclas SMA	139
Tabla A.63. Parámetros estimados para las mezclas SMA	139

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I.1. Esquema Experimental del Proyecto	19
Figura 2.1. Granulometrías Densas usadas en este proyecto	30
Figura 2.2. Granulometrías Discontinuas (SMA) usadas en este proyecto	31
Figura 3.1 Molde metálico para la compactación	40
Figura 3.2. Compactador de Tambor	41
Figura 3.3. Dispositivo de calibración de altura	41
Figura 3.4. Bloque y vigas de mezcla asfáltica	42
Figura 4.1. Relaciones esperadas para el ensayo a fatiga	48
Figura 4.2. Equipo de Viga de Fatiga	49
Figura 4.3. Cámara térmica y equipo de fatiga	51
Figura 4.4. Esquema de Carga	52
Figura 4.5. Resultados del ensayo de fatiga para Agregado de Belén	55
Figura 4.6. Resultados del ensayo de fatiga para Agregado de Guápiles	56
Figura 4.7. Resultados del ensayo de fatiga para Agregado de Las Cóncavas	57
Figura 5.1. Modelo del Instituto del Asfalto vrs Modelo General	68
Figura 5.2. Modelo del Instituto del Asfalto vrs Modelo de Densas	68
Figura 5.3. Modelo del Instituto del Asfalto vrs Modelo de SMA	69
Figura 5.4. Modelo de Shell vrs Modelo General	69
Figura 5.5. Modelo de Shell vrs Modelo de Densas	70
Figura 5.6. Modelo de Shell vrs Modelo de SMA	70
Figura 5.7. Modelo de PDMAP vrs Modelo General	71
Figura 5.8. Modelo de PDMAP vrs Modelo de Densas	71
Figura 5.9. Modelo de PDMAP vrs Modelo de SMA	72
Figura 5.10. Grafico de ajuste entre Modelo del Inst. del Asfalto y el General	73
Figura 5.11. Grafico de ajuste entre Modelo del Inst. del Asfalto y el Densas	73
Figura 5.12. Grafico de ajuste entre Modelo del Inst. del Asfalto y el SMA	74
Figura 5.13. Grafico de ajuste entre Modelo de Shell y el Modelo de General	74
Figura 5.14. Grafico de ajuste entre Modelo de Shell y el Modelo de Densas	75
Figura 5.15. Grafico de ajuste entre Modelo de Shell y el Modelo de SMA	75
Figura 5.16. Grafico de ajuste entre Modelo de PDMAP y el Modelo de General	76
Figura 5.17. Grafico de ajuste entre Modelo de PDMAP y el Modelo de Densas	76
Figura 5.18. Grafico de ajuste entre Modelo de PDMAP y el Modelo de SMA	77

INTRODUCCIÓN

I. Justificación

Las carreteras constituyen para Costa Rica el principal medio de comunicación interna y son de gran importancia para la economía nacional; pero, debido al incremento de la flota vehicular presentado en nuestro país durante las últimas décadas, se ha dejado al descubierto el gran problema que existe en la infraestructura vial nacional (deterioro estructural y funcional), generando esto un gran costo de operación para los usuarios y muchos gastos por parte del Gobierno en arreglos que muchas veces son temporales (estrategias de administración no efectivas en costos).

Debido a que diariamente el Gobierno tiene que solucionar problemas que se presentan en las carreteras, no puede usar el poco dinero con el que cuenta para inversiones orientadas a ampliaciones de capacidad, ni reconstrucción; únicamente se invierte en conservación, muchas veces extemporáneamente (con un uso no eficiente del presupuesto). Siendo una rutina diaria el mal aprovechamiento que se le da a los recursos y materias primas con las que se cuenta.

De ahí se deriva que no se le dé una adecuada administración a los pavimentos, generando un deterioro acelerado de las mismas, lo cual se suma a un no tan poco frecuente mal diseño de materiales, como por ejemplo la mezcla asfáltica de la capa de ruedo, no tomando en cuenta cambios que se han dado en los últimos años como el aumento de las cargas vehiculares y las condiciones extremas de intemperismo (precipitación), dejando de lado igualmente la evaluación de desempeño (fatiga, y deformación plástica).

El deterioro de los pavimentos generalmente se manifiesta en desintegración superficial, pérdida de adherencia asfalto-agregado, agrietamiento por fatiga o aparición de depresiones y protuberancias, aspectos que muchas veces se pueden evitar o prever aplicando adecuados modelos de diseño.

Los modelos de desempeño usados actualmente para el diseño de las estructuras viales han sido desarrollados en otros países bajo condiciones ideales para los mismos, que en su mayoría no se asemejan a las que vivimos en este país, por lo que aunque se quiera diseñar un pavimento de la mejor manera, no se están aplicando las herramientas adecuadas; lo que disminuye grandemente la vida útil de los mismos.

Por esto es necesario evaluar algunos de los modelos disponibles actualmente a nivel internacional tales como el de PDMAP (Métodos Probabilísticos para el Diseño de Pavimentos Asfálticos) y el del Instituto del Asfalto, y ajustarlos a las condiciones tanto de cargas como de materias primas utilizadas en nuestro país. Este proyecto pretende desarrollar modelos de agrietamiento por fatiga para el concreto asfáltico de Costa Rica aplicado en capas de ruedo que se ajusten a las necesidades y características de nuestro país.

Se pretende asociar las condiciones de sollicitación real y las características particulares de cada estructura de pavimento con las repeticiones de carga para la falla.

II. Importancia

Nuestro país destina muy pocos recursos para invertir en la estructura vial, por lo que es de gran importancia que las inversiones realizadas sean de calidad, usando diseños adecuados que aseguren un buen desempeño de las mismas y eviten inversiones innecesarias en reparaciones a corto plazo. También es importante que la metodología de diseño estructural sea asociada con las condiciones reales de sollicitación.

Las características que presenta nuestro país, en cuanto a tipos de agregados, asfaltos y cargas son muy diferentes a las que se presentan en países más desarrollados como Estados Unidos y otros, donde se desarrollaron las metodologías disponibles actualmente para el diseño de las mezclas asfálticas. Esto genera el rápido

deterioro de las mismas ya que los diseños teóricos de laboratorio no se ajustan fielmente a la realidad nacional. Como parte de dichas metodologías de diseño considérense las funciones de transferencia de carga a deterioro, particularmente por fatiga (propósito de este proyecto).

De lo anterior surge la importancia de tener modelos adecuados de relación entre la materia prima (agregados, asfaltos y otros) aplicada en nuestro país y la vida útil de la capa asfáltica.

Uno de los de los principales problemas que se dan en nuestro país es el agrietamiento por fatiga, manifestado tanto como agrietamiento tipo piel de cocodrilo como por grietas longitudinales; tipo de deterioro que se encuentra muy asociado a las cargas de tránsito, y se puede minimizar desarrollando modelos adecuados que relacionen el número de cargas para la falla con la deformación unitaria, en condiciones de carga con respuesta elástica.

Mediante este proyecto se pretende verificar la aplicabilidad de funciones de transferencia de aplicación internacional (por ejemplo PDMAP al 10% y 40% de agrietamiento) para las condiciones de pavimento típicas de Costa Rica; además, calibrar dichas ecuaciones para el entorno costarricense (usando en esta primera etapa experimental ensayos de laboratorio). Comprender el fenómeno de agrietamiento por fatiga, en nuestro entorno, permitirá formular recomendaciones para incrementar la capacidad de carga de nuestro concreto asfáltico y de los paquetes estructurales típicos de nuestro medio.

III. Antecedentes

Nuestro país no destina suficientes recursos para invertir en la infraestructura vial, por lo que es de gran importancia optimizar la calidad de las inversiones realizadas, usando diseños adecuados que aseguren un buen desempeño de las mismas y eviten inversiones innecesarias en reparaciones a corto plazo. También es

importante que la metodología de diseño estructural sea asociada con las condiciones reales de sollicitación.

Las características que presenta nuestro país, en cuanto a tipos de agregados, asfaltos y cargas son muy diferentes a las que se presentan en países más desarrollados como Estados Unidos y otros, donde se desarrollaron las metodologías disponibles actualmente para el diseño de las capas asfálticas. Lo cual genera el rápido deterioro de las mismas, ya que los diseños realizados no se ajustan fielmente a la realidad nacional. Como parte de dichas metodologías de diseño considérense las funciones de transferencia de carga a deterioro, particularmente por fatiga (propósito de este proyecto).

De lo anterior surge la importancia de tener modelos adecuados de relación entre la materia prima (agregados, asfaltos y otros) aplicada en nuestro país y la vida útil de la capa asfáltica.

Uno de los principales problemas que se dan en nuestro país es el agrietamiento por fatiga, también conocido como grietas de piel de cocodrilo y agrietamiento longitudinal; el cual se encuentra muy asociado a las cargas de tránsito, y se puede minimizar desarrollando modelos adecuados que relacionen el número de cargas para la falla con la deformación unitaria en condiciones de carga con respuesta elástica, a la hora de diseñar las mezclas que se van a aplicar en la carretera; dentro de una metodología de diseño mecanístico.

Mediante este proyecto se pretende verificar la aplicabilidad de funciones de transferencia de aplicación internacional (por ejemplo PDMAP al 10% y 40% de agrietamiento) para las condiciones de pavimento típicas de Costa Rica; además, calibrar dichas ecuaciones para el entorno costarricense (usando en esta primera etapa experimental ensayos de laboratorio). Comprender el fenómeno de agrietamiento por fatiga, en nuestro entorno, permitirá formular recomendaciones para incrementar la

capacidad de carga de nuestro concreto asfáltico y de los paquetes estructurales típicos de nuestro medio.

IV. Objetivo General

Establecer, con base en modelos determinísticos, las funciones de transferencia entre deformación unitaria a la tracción crítica y cantidad de repeticiones para el agrietamiento por fatiga, para mezclas asfálticas representativas de la realidad de la pavimentación en Costa Rica. Dichos modelos determinísticos tomarán en cuenta factores relevantes de la capa asfáltica (tipo de ligante, granulometría, contenido de asfalto efectivo, VMA, entre otros) y factores relevantes del paquete estructural (rigideces y espesores de capas).

V. Objetivos Específicos

1. Identificar variables relevantes (materia prima, concreto asfáltico, sección estructural) con respecto a la estimación de repeticiones para la falla por fatiga.
2. Comparar la estimación de repeticiones de carga para la falla a la fatiga por modelos generales (PDMAP, Instituto del Asfalto) y modelos a escala de laboratorio por desarrollar en esta investigación.
3. Comparar la resistencia al agrietamiento por fatiga para mezclas de granulometría densa y discontinúa.
4. Comparar ventajas y desventajas de la resistencia a fatiga de asfaltos de alta viscosidad (de refinadora y/o modificados con polímeros) con respecto a asfaltos convencionales.

5. Formular recomendaciones técnicas con base en propiedades volumétricas y físico-mecánicas, a considerar en la definición de dosificaciones de diseño para mezcla asfáltica, con el objeto de aumentar las probabilidades de desempeño exitoso bajo la perspectiva de resistencia al agrietamiento por fatiga.

VI. Alcances y Limitaciones

El presente proyecto está enmarcado por los siguientes aspectos:

- El proyecto es un estudio de laboratorio, así que el trabajo de campo queda pendiente para eventuales proyectos.
- Los agregados a incorporar son de tipo ígneo provenientes del Valle Central (Tajo Las Cóncavas y tajo Belén-Santa Ana) y sedimentarios provenientes de La Esmeralda en Guápiles. Todos son producto de la trituración en un quebrador.
- Analiza solo mezclas asfálticas en caliente.
- Las comparaciones económicas con respecto al uso de un tipo u otro de materia prima y su efecto sobre el Beneficio vrs Costo (B/C) para un proyecto vial queda fuera del alcance de este estudio.
- Limitado a secciones estructurales de pavimentos en Costa Rica. No se consideran cargas mayores a 10000 kg.
- Considera materiales homogéneos e isotrópicos.
- No se consideran temperaturas extremas bajas (casos como El Volcán Irazú, etc.). Se consideran las condiciones de temperatura ambiente promedio (alrededor de 25°C).

VII. Metodología Experimental

Para evaluar la capacidad de resistir la fatiga de una mezcla asfáltica y estimar la vida útil del pavimento por fractura se aplica la prueba de flexiones repetidas. Para esta prueba se aplican repetidas cargas en dos puntos del espécimen; la deflexión causada es medida en el centro de la viga a partir de la cual se obtienen las deformaciones unitarias en la fibra extrema de la viga; y se determina a que deformación y a que número de ciclos de carga se da la falla.

Mediante un software (Everstress) se plantean estructuras de pavimentos representativas, modelando la combinación de las diferentes condiciones, cargas de 6000 Kg, 8000 Kg y 10000 Kg para un eje dual con una separación de llanta de 30 cm; espesores de capa de ruedo de 5 cm, 7.5 cm y 10 cm; base granular de 10 cm, 15 cm, 20 cm y 25 cm; y una sub-base de 25 cm; conformando así 36 escenarios para determinar niveles de deformación unitaria a la tracción Representativos de las condiciones de carga y estructurales típicas en nuestro medio.

Debido a que esta capacidad a la fatiga de las mezclas asfálticas está determinada en gran parte por la calidad y características de la materia prima utilizada, y su forma de dosificación, es necesario evaluar estos aspectos. La solución propuesta analiza estos diferentes factores (fuentes de los agregados, tipos de aditivos, tipo de ligantes, etc.) con el fin de determinar cuáles de estos son relevantes en la capacidad a la resistencia por fatiga de la mezcla asfáltica, mediante el ensayo de laboratorio descrito anteriormente.

Los factores experimentales considerados son los siguientes:

- Tipos de mezcla: 2 (densas y discontinuas)
- Tipos de ligantes: 2 (PG70 y AC30)
- Aditivos para ligante: 2 (SBS y ninguno)
- Fuente de Agregados: 3 (La Esmeralda, Belén - Santa Ana, Las Cónavas)

- Niveles de deformación unitaria: 3 (por definir a partir de la modelación mecánica)

Nota: El ensayo de vigas de flexión se aplicó bajo la modalidad de deformación unitaria controlada que es representativa del funcionamiento estructural de capas asfálticas de poco espesor (menor a 7.5 cm).

Debido a la combinación de los factores considerados, se realizaron en total 36 tratamientos experimentales; al hacerse especímenes o vigas por duplicado, el total correspondiente es de 72 especímenes.

La caracterización de los agregados, granulometrías, ligante y aditivos; dosificación de diseño; densidad máxima teórica y propiedades de cada mezcla se obtienen de estudios realizados en otros trabajos finales de graduación.

Luego se desarrollaron modelos de regresión con los datos obtenidos de los ensayos para la falla por fatiga en vigas a flexo-tracción, encontrando las variables significativas asociadas con la falla; posteriormente se trazan familias de curvas para fatiga por tipo de granulometría (densa y discontinua). Mediante comparación estadística se determina la diferencia entre las mezclas densas y discontinuas, entre mezclas con ligante PG70 y con ligante AC30; además del tipo de agregado, sedimentario o ígneo. Con lo cual se realiza un listado de recomendaciones para mejorar la capacidad a la fatiga de las mezclas en Costa Rica.

Por último se lleva a cabo una modelación con software (Everstress y/o software para Elemento Finito) para asociar las condiciones de estructura de pavimentos con deformaciones unitarias. A partir de lo cual se comparan los valores de número de repeticiones medidas en el laboratorio y los valores teóricos determinados con modelos generales como el PDMAP al 10% de área agrietada, al 45% de área agrietada y el WSDOT; determinando una relación entre el valor medido y el teórico para cada uno de los modelos, y de esta manera calibrar los modelos para Costa Rica.

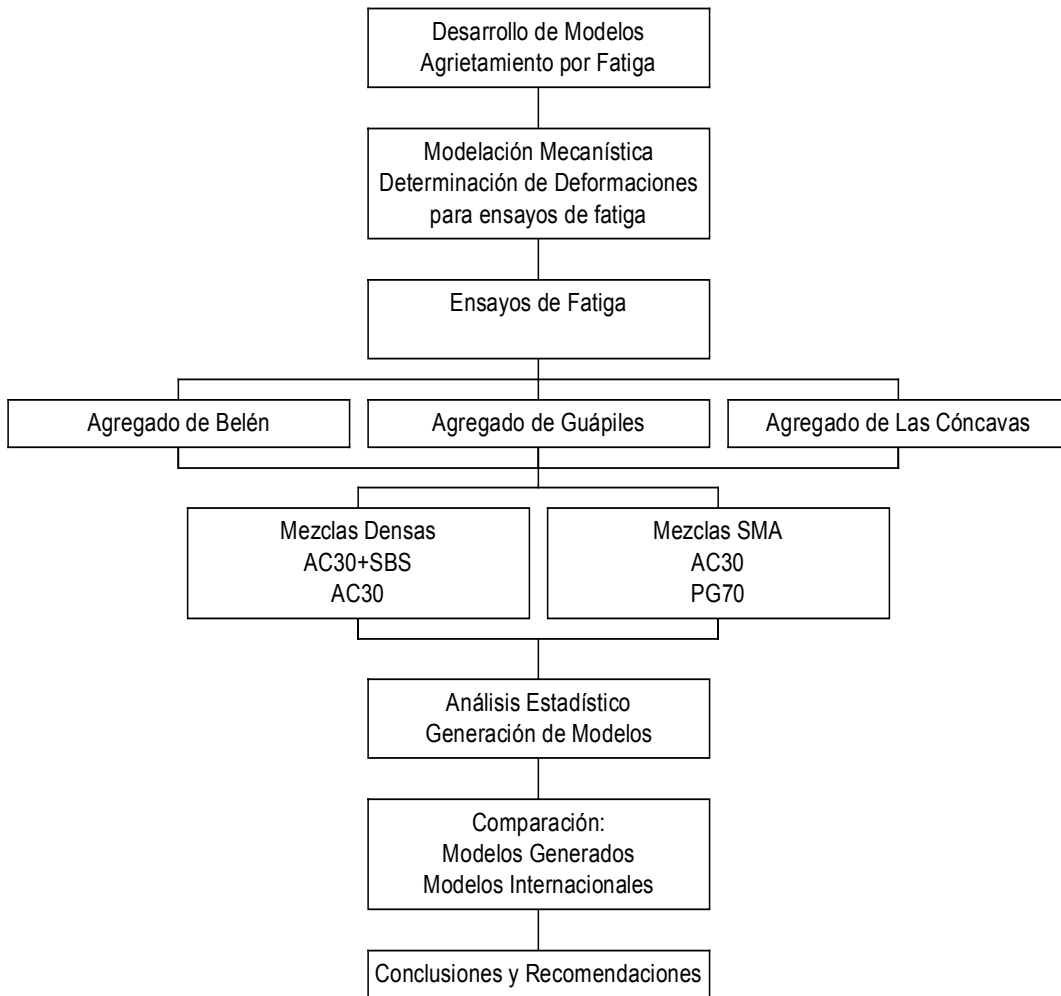


Figura I.1. Esquema Experimental del Proyecto.

1.1. Mezcla Asfáltica

La mezcla asfáltica de concreto asfáltico es un material elaborado mediante la combinación y distribución de un ligante asfáltico, un agregado mineral y en algunos casos se utilizan modificantes o aditivos para el ligante y para el agregado. El ligante asfáltico puede ser un cemento asfáltico o un cemento asfáltico modificado, el cual aglutina las partículas en una masa cohesiva, además al ser éste impermeable al agua, igualmente restringe la permeabilidad del concreto asfáltico cuando ha sido apropiadamente densificado. El agregado por su parte forma un esqueleto pétreo que aporta resistencia y rigidez. Los posibles aditivos que se agreguen pueden variar una o varias propiedades físico-mecánicas de la mezcla asfáltica, de acuerdo con las necesidades que se requieran para las condiciones de cada proyecto. Para su uso estructural es sometida a un proceso de compactación, que permite optimizar la fricción del esqueleto granulométrico y la impermeabilidad de la mezcla asfáltica.

Este material es muy usado en proyectos de infraestructura vial, esto principalmente debido a la facilidad de producción y colocación dentro de la estructura de un pavimento. Además facilita las acciones de mantenimiento, rehabilitación y mantenimiento .

El desempeño del concreto asfáltico está determinado por las proporciones que se apliquen de agregado, ligante asfáltico, aire y posibles aditivos; por lo que el diseño, producción y colocación de este debe tener el objeto de ciertas propiedades físicas y volumétricas.

Según el proceso de elaboración, la mezclas asfálticas se clasifican como mezclas asfálticas en caliente (ligante asfáltico aplicado en caliente) o mezclas asfálticas en frío (ligante asfáltico aplicado como emulsión asfáltica). En este proyecto se estudiaron únicamente las mezclas en caliente.

1.1.1. Propiedades Volumétricas

Las propiedades volumétricas de la mezcla tienen influencia directa sobre las propiedades físicas de la misma. Estas están determinadas por la composición porcentual volumétrica de cada uno de sus constituyentes (agregado mineral, ligante asfáltico, aire y/o aditivos).

1.1.1.1. Vacíos de aire

Es el contenido de espacios llenos con aire (porcentaje por volumen). Establecido un rango adecuado de 3.0% a 5.0%. Porcentajes altos de vacíos se asocian a problemas de durabilidad y fatiga, mientras que valores bajos determinan problemas de estabilidad y exudación.

1.1.1.2. Asfalto Efectivo

Es el ligante asfáltico que recubre el agregado y forma una película delgada alrededor de este (asfalto no absorbido). Un exceso determina problemas de estabilidad y resistencia al resbalamiento, una carencia provoca problemas de durabilidad, trabajabilidad y fatiga.

1.1.1.3. Asfalto Absorbido

Es la cantidad de ligante asfáltico absorbido por el agregado, expresado por lo general como porcentaje del peso del agregado. Este asfalto no recubre el agregado y debe mantenerse uniforme, para mantener el contenido de asfalto efectivo constante. El asfalto absorbido es siempre sustraído del contenido de asfalto para determinar el asfalto efectivo, el cual tiene funciones más relevantes e importantes en la mezcla asfáltica.

1.1.1.4. Vacíos en el agregado mineral (VAM)

El espacio intergranular ocupado por el asfalto efectivo y el aire en una mezcla compactada se denomina vacíos en el agregado mineral. La especificación depende del tamaño máximo del agregado. Una carencia determina problemas de estabilidad durabilidad, fatiga, trabajabilidad, entre otras propiedades.

1.1.1.5. Vacíos llenos con asfalto (VFA)

Es el porcentaje del VAM que contiene asfalto, específicamente es el contenido de cavidades llenas con asfalto en volumen efectivo relativo a la cantidad de cavidades en el agregado (llenas con aire y asfalto efectivo). Un exceso determina problemas de estabilidad y resistencia al resbalamiento (asociada con exudación y pérdida de microtextura) y una carencia provoca problemas de durabilidad, fatiga y trabajabilidad.

1.1.2. Propiedades Físicas

Los métodos de diseño buscan ciertas propiedades meta como estabilidad, durabilidad, resistencia a la fatiga, impermeabilidad, trabajabilidad y resistencia al resbalamiento. Todas estas características están correlacionadas entre sí, una mejora en alguna propiedad puede significar un deterioro en otra; por lo que el diseño de mezcla busca optimizar la dosificación de sus componentes, para producir una mezcla que cumpla ciertos parámetros establecidos, mediante un balance de sus propiedades.

1.1.2.1. Estabilidad

Capacidad de la mezcla de resistir distorsiones ante las cargas de tránsito, una falta de esta se ve manifestada como roderas o corrugaciones (deformación permanente). La estabilidad depende de la fricción interna y la cohesión, la fricción entre las partículas de agregado se relaciona con las características del agregado tales como graduación, forma y textura); además películas gruesas de asfalto inducen una pérdida de fricción entre los agregados.

1.1.2.2. Durabilidad

La durabilidad es la propiedad que permite a la mezcla asfáltica resistir cambios en las propiedades del ligante asfáltico (envejecimiento), degradación del agregado y desnudamiento, como consecuencia del intemperismo y/o tránsito. Un contenido de asfalto óptimo, una graduación densa de agregado y compactación suficiente para reducir el porcentaje de vacíos producen un incremento en la durabilidad de la mezcla. Tomando en cuenta que se puede afectar sensiblemente otras propiedades.

1.1.2.3. Trabajabilidad

Esta característica esta asociada con la facilidad con la que mezcla puede ser colocada y compactada, y se ve afectada por la graduación de los agregados. El polvo mineral (agregado pasando la malla No. 200) se relaciona con la trabajabilidad, en vista de que un mayor contenido de polvo mineral implica una mezcla menos trabajable.

1.1.2.4. Resistencia a la fatiga

Se refiere a la resistencia de la mezcla ante esfuerzos y deformaciones unitarias repetidas, ocasionadas por las cargas de tránsito; la falta de resistencia se ve manifestada en el pavimento como fisuras o grietas, fenómeno que se denomina como agrietamiento por fatiga.

Conforme el porcentaje de vacíos de la mezcla compactada se incrementa, la resistencia a la fatiga decrece. Además, asfaltos endurecidos o viscosos tienden a reducir la vida útil del pavimento, por resistencia a fatiga.

Espesores de capa mayores determinan una mayor capacidad de resistencia a la fatiga; esto debido a que se reduce el nivel de deformación unitaria en la fibra inferior de capa y hay mayor material para evitar que una grieta se proyecte a la superficie

1.2. Tipos de Mezclas Asfálticas

1.2.1. Mezclas asfálticas de granulometría densa (DGM)

Es una mezcla uniforme y homogénea, elaborada con ligante asfáltico y agregado bien graduado, con tamaño máximo nominal entre 37.5 mm (1 1/2 plg) y 9.5mm (3/8 plg). Su dosificación granulométrica consiste de un 30% a 50% de agregado grueso, un 50% a 70% de agregado fino y menos del 8% de polvo mineral. Debido a las cantidades de agregado en proporciones adecuadas para todos los tamaños, estas mezclas tienen gran número de contactos entre las partículas, que pueden dar una alta resistencia friccional y reducir la posibilidad de trituración de las

partículas en los puntos de contacto. Este tipo de mezcla es de interés para el presente estudio.

1.2.2. Mezcla de granulometría discontinua (SMA Matriz de Agregado Grueso)

Su composición granulométrica se conforma por agregados gruesos (70% a 80%); casi no contiene material de tamaños intermedios (10% a 20%), pero posee mayores cantidades de polvo mineral (alrededor del 10%). Las mezclas SMA tienen un alto contenido de asfalto, lo cual requiere el uso de fibras de celulosa para minimizar la separación del ligante asfáltico y favorecer películas de asfalto alrededor del agregado de 4 a 5 veces el espesor de las de mezclas densas (el área superficial de la fibra determina un incremento sustancial en el contenido de asfalto efectivo y el espesor de película de asfalto alrededor del agregado). Este es el otro tipo de mezclas de interés en esta investigación.

1.2.3. Mezclas de granulometría abierta (OGFC)

Las mezclas de granulometría abierta son diseñadas con un alto porcentaje de vacíos, entre un 10% y 20%, mientras que las mezclas densas y discontinuas para un 3% a 5%. El propósito de un alto porcentaje de vacíos es de drenar el agua llovida a través de la mezcla, y de esta manera mejorar la adherencia llanta-pavimento cuando llueve. Generalmente se utilizan aditivos (elastómeros), diseñados para que el agua filtre a través de la mezcla y evitar la separación del ligante-agregado. Las mezclas de granulometría abierta no se estudian en la presente investigación.

2.1. Agregados

Los agregados son partículas de composición mineral producto de la fragmentación de rocas o de depósitos naturales. Estos se clasifican como agregado grueso (retenido en la malla No. 4), agregado fino (pasando la malla No. 4) y polvo mineral (pasando la malla No. 200).

La metodología de diseño SUPERPAVE establece la necesidad de conocer las características físico-mecánicas del agregado, ya que estas influyen directamente en el desempeño de la mezcla asfáltica. Esta normativa ha recopilado procedimientos de ensayo para determinar estas características, así como especificaciones mínimas, las cuales dependen del nivel de tránsito y de la posición de los agregados dentro de la estructura del pavimento (capa de ruedo o de base).

2.1.1. Características de los agregados

Las características establecidas son las siguientes: gravedad específica bruta del agregado grueso, gravedad específica bruta del agregado fino, angularidad del agregado grueso, angularidad del agregado fino, partículas planas y elongadas, y abrasión en la máquina de Los Ángeles. Adicionalmente se abre la posibilidad para la evaluación de requisitos adicionales como la sanidad y contenido de partículas friables.

2.1.1.1. Gravedad Específica del Agregado Grueso y Fino

La gravedad específica equivale a la razón de masa por unidad de volumen de material a una temperatura dada, con la relación de masa del mismo volumen de agua destilada y su respectivo volumen. Las pruebas se realizan según las normas ASTM C127 y C128. Los agregados son porosos, por lo que tienen la capacidad de absorber agua y ligante asfáltico, la relación de absorción agua-asfalto varía según el agregado (de $\frac{1}{4}$ a $\frac{3}{4}$), siendo siempre mayor la absorción de agua que la de asfalto, en vista de su mayor fluidez y menor densidad.

En la Tabla 2.1 se presentan las gravedades específicas brutas de cada una de las granulometrías utilizadas en cada una de las tres fuentes de agregados valoradas; así como el porcentaje de absorción.

Tabla 2.1. Gravedades específicas y porcentajes de absorción.

Fuente de Agregado	Granulometría	Gravedad Específica Bruta (Gsb)	% Absorción
Belén	DGM3	2.49	2.7
Belén	SMA3	2.61	1.8
Guápiles	DGM3	2.97	2.3
Guápiles	SMA2	2.76	1.9
Las Cóncavas	DGM2	2.48	4.2
Las Cóncavas	SMA3	2.60	2.7

*Fuente: Referencias 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7.

2.1.1.2. Angularidad del Agregado Grueso y Agregado Fino

La angularidad del agregado garantiza un alto grado de fricción interna y de resistencia a la deformación plástica. Para la parte gruesa se define como el porcentaje por peso de los agregados retenidos en la malla No. 4 (4.75 mm) con una o más caras fracturadas. Usualmente se obtienen contando las partículas para determinar las caras fracturadas. Una cara fracturada se define como un corte transversal sobre la partícula de agregado de manera que su redondez se ve considerablemente alterada. La prueba se realiza según ASTM D5821.

Para el agregado fino esta propiedad se define como el porcentaje de vacíos de espacio presentes en una muestra levemente compactada (energía de densificación estándar) de agregado menor a 2.36 mm (malla No. 8). Un alto contenido de vacíos corresponde a una elevada cubicidad, que conlleva a angularidad y a la resistencia a la deformación por fricción interna del esqueleto granulométrico. La prueba está definida por la norma ASTM C1252. En la Tabla 2.2 se presentan los porcentajes de caras fracturadas para el agregado grueso y el porcentaje de angularidad de agregado fino.

Tabla 2.2. Porcentaje de caras fracturadas y angularidad.

Fuente de Agregado	Granulometría	Agregado Grueso		Agregado Fino
		1+Caras Fracturadas	2+Caras Fracturadas	Angularidad (%)
Belén	DGM3	100	100	40.0
Belén	SMA3	100	100	56.0
Guápiles	DGM3	100	96.7	42.0
Guápiles	SMA2	100	96.7	51.0
Las Cónavas	DGM2	100	100	32.4
Las Cónavas	SMA3	100	100	42.5

*Fuente: Referencias 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7.

La siguiente tabla muestra los requerimientos de Superpave para la angularidad del agregado grueso y el agregado fino para diversas categorías de tránsito.

Tabla 2.3. Requerimientos Superpave para la angularidad del agregado.

Ejes Equivalentes de Diseño (10 ⁶)	Angularidad Ag Grueso		Angularidad Ag Fino	
	=100 mm	>100 mm	=100 mm	>100 mm
<3.0	55/-	-/-	---	---
<1	65/-	-/-	40	---
<3	75/-	50/-	40	40
<10	85/80	60/-	45	40
<30	95/90	80/75	45	40
<100	100/100	95/90	45	45
=100	100/100	100/100	45	45

Nota: "85/80":85% del agregado grueso tiene una cara fracturada y 80% tiene dos caras fracturadas

**Fuente: Referencias 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7.

2.1.1.3. Partículas planas y elongadas

Esta característica del agregado se determina para la fracción gruesa, de acuerdo con el procedimiento que se establece en la norma ASTM D4791. Se define como el porcentaje por peso de agregado grueso que tiene una relación de dimensiones largo-ancho que excede 1:5 (criterio original) o 1:3 (para SMA).

En la Tabla 2.4 se presentan los porcentajes de partículas planas y elongadas para los agregados utilizados con una relación 1:3.

Tabla 2.4. Partículas planas y elongadas.

Fuente de Agregado	Granulometría	% Partículas planas y elongadas (1:3)	Ejes Equivalentes de Diseño (106)	% Partículas planas y elongadas max
Belén	DGM3	6	<3.0	---
Belén	SMA3	6	<1	---
Guápiles	DGM3	8	<3	10
Guápiles	SMA2	8	<10	10
Las Cónavas	DGM2	0	<30	10
Las Cónavas	SMA3	0	<100	10
*Fuente: Referencias 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7.			=100	10

2.1.1.4. Abrasión en máquina de Los Ángeles

Con la prueba de abrasión en la máquina de Los Ángeles (AASHTO T96) se estima la resistencia del agregado grueso a la abrasión y degradación mecánica durante el manejo, construcción y vida de servicio. Esta resistencia se mide como el porcentaje por masa del agregado que se pierde a través de la malla No. 4 (4.75 mm) durante la prueba de degradación mecánica. En la Tabla 2.5 se muestran los porcentajes de abrasión en la máquina de Los Ángeles para cada una de las granulometrías utilizadas. Tanto la norma nacional como Superpave norman esta característica en un porcentaje de abrasión menor o igual al 30 %.

Tabla 2.5. Porcentaje de abrasión en la máquina de Los Ángeles.

Fuente de Agregado	Granulometría	% Abrasión
Belén	DGM3	17
Belén	SMA3	17
Guápiles	DGM3	25
Guápiles	SMA2	25
Las Cónavas	DGM2	20
Las Cónavas	SMA3	20

*Fuente: Referencias 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7.

2.1.1.6. Resumen de propiedades

En la Tabla 2.6 se presenta un resumen de las propiedades del agregado utilizado, además se muestran los requisitos y requisitos que deben cumplirse.

Tabla 2.6. Resumen de propiedades.

Fuente de Agregado	Belén		Guápiles		Las Cónnavas		Normativa o Especificación	
	DGM3	SMA3	DGM3	SMA2	DGM2	SMA3	DGM	SMA
Granulometría	DGM3	SMA3	DGM3	SMA2	DGM2	SMA3	DGM	SMA
Gravedad Esp Bruta (Gsb)	2.49	2.61	2.97	2.76	2.48	2.60	----	----
% Absorción	2.7	1.8	2.3	1.9	4.2	2.7	----	----
1+Caras Fracturadas	100	100	100	100	100	100	100% min	100% min
2+Caras Fracturadas	100	100	96.7	96.7	100	100	90% min	90% min
Angularidad (%)	40.0	56.0	42.0	51.0	32.4	42.5	45% min	45% min
% Part planas y elong (1:3)	6	6	8	8	0	0	10% max	20% max
% Abrasión	17	17	25	25	20	20	30% max	30% max

*Fuente: Referencias 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7.

2.1.2. Granulometría

La graduación o la granulometría es la característica que más influye en el desempeño de la mezcla asfáltica, en parámetros tales como: rigidez, estabilidad, permeabilidad, trabajabilidad, resistencia al daño por humedad y resistencia al agrietamiento por fatiga. La graduación es la distribución de los tamaños de las partículas de agregado. La metodología SUPERPAVE define una especificación para la granulometría del agregado; emplea cartas de graduación con los tamaños de tamiz estándar elevados a 0.45, con puntos de control y una zona de precaución. Para que una granulometría sea válida en SUPERPAVE, se requiere que esta pase por los puntos de control y evite la zona de precaución. La zona de precaución es usada para evitar mezclas que tengan un alto contenido de arena fina en proporción a la totalidad de los finos, que tiene una tendencia plástica. Además, recomienda, sin exigirlo mezclas que estén por debajo de la zona de restricción.

Los requerimientos de control de la metodología de SUPERPAVE no fueron hechos para ser aplicados a tipos de mezcla especiales tales como SMA o mezclas abiertas. En el caso de las mezclas SMA, el Centro Nacional de Tecnología Asfáltica NCAT de Estados Unidos, estableció una serie de bandas de graduación para diferentes tamaños máximos nominales con el fin de garantizar un contacto interparticular entre el agregado.

Las granulometrías usadas en este proyecto obedecen a estudios previos de desempeño para mezclas asfálticas, correspondientes a las referencias 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7. A continuación se muestran las granulometrías densas usadas en este proyecto, con sus respectivas restricciones, (ver Tabla 2.7 y Figura 2.1).

Tabla 2.7. Granulometrías Densas usadas en este proyecto.

Malla	Tamaño (mm)	% PASANDO			Especificación	
		Belén DGM3	Guápiles DGM3	Las Cóncavas DGM2	Puntos de Control (DGM)	Zona de Prevención
¾"	19.00	100	100	100	100-100	----
½"	12.50	95	95	95	90-100	----
3/8"	9.500	63	63	71	----	----
No. 4	4.760	50	50	48	----	----
No.8	2.380	50	50	30	28-58	39.1-39.1
No.16	1.190	40	40	26	----	25.6-31.6
No.30	0.600	31	31	22	----	19.1-23.1
No.50	0.300	26	26	10	----	15.5-15.5
No.100	0.150	19	19	7	----	----
No.200	0.075	6	6	6	2-10	----

*Fuente: Referencias 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7.

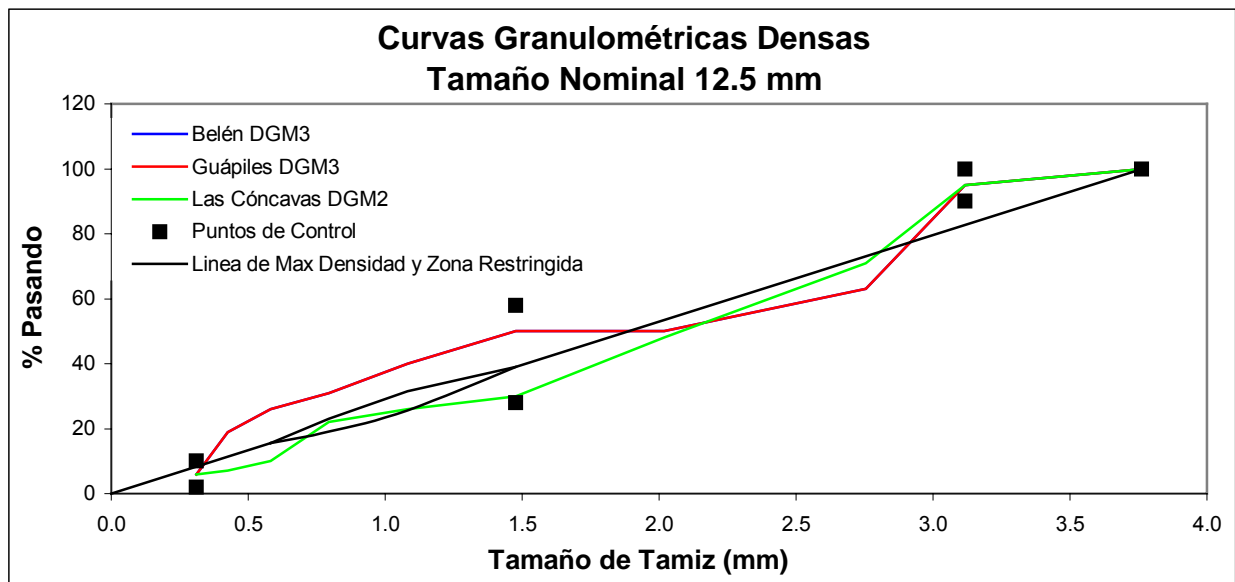


Figura 2.1. Granulometrías Densas usadas en este proyecto.

La información correspondiente a las granulometrías discontinuas (SMA) se encuentra en la Tabla 2.8 y en la Figura 2.2, que se muestran a continuación.

Tabla 2.8. Granulometrías Discontinuas (SMA) usadas en este proyecto.

Malla	Tamaño (mm)	% PASANDO			Especificación
		Belén SMA3	Guápiles SMA2	Las Cóncavas SMA3	Punto Control Tamaño Nominal 12.5 mm (SMA)
¾"	19.00	100	100	100	100-100
½"	12.50	92	94	92	90-100
3/8"	9.500	40	45	40	26-78
No. 4	4.760	26	23	26	20-28
No.8	2.380	21	21	24	16-24
No.16	1.190	20	19	23	13-21
No.30	0.600	19	18	23	12-18
No.50	0.300	18	16	20	12-15
No.100	0.150	16	15	17	----
No.200	0.075	15	13	12	8-10

*Fuente: Referencias 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7.

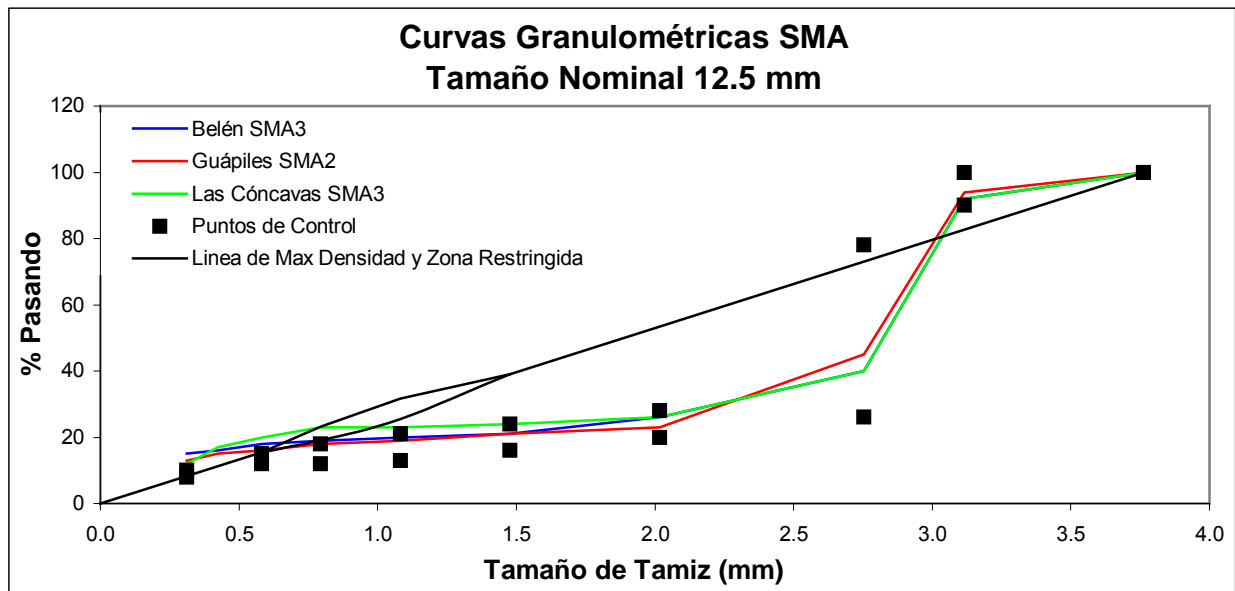


Figura 2.2. Granulometrías Discontinuas (SMA) usadas en este proyecto.

Un aspecto que debe considerarse en las curvas granulométricas es el contenido de polvo adherido al agregado en los diferentes tamices, por lo que se deben hacer las correcciones por polvo adherido para cada granulometría, tal como se

muestra en el Apéndice 1. Dicha situación en una planta se debe ajustar a partir de la calibración del sistema de retorno de finos.

2.2. Ligantes Asfálticos

El ligante asfáltico es un material cementante que se puede encontrar en estado sólido, semi-sólido o viscoso; constituido principalmente por hidrocarburos de alto peso molecular donde el 70%-90% del peso corresponde a carbonos e hidrógenos. Este material es obtenido de la destilación fraccionaria del petróleo, específicamente preparado para la elaboración de mezcla asfáltica.

Dentro de la mezcla asfáltica, su función es aglutinar los agregados de manera que haya impermeabilidad, trabazón en la estructura interna del agregado y durabilidad (resistencia al efecto por humedad y envejecimiento del ligante)

La metodología SUPERPAVE clasifica, caracteriza y denomina los ligantes asfálticos de acuerdo con su grado de desempeño, tomando en cuenta condiciones climáticas reales de un proyecto en específico y una serie de etapas que simulan el envejecimiento que tendrá el ligante durante su vida útil.

Las condiciones de envejecimiento que tendrá el ligante se agrupan en tres etapas:

1. Asfalto original: durante el transporte, almacenaje y manejo del mismo, sin envejecimiento.
2. Asfalto durante la producción y colocación de la mezcla asfáltica, con algo de oxidación y volatilización; simulado por medio del método del horno rotatorio de capa delgada (RTFO).
3. Envejecimiento del ligante producto de un severo proceso de oxidación a lo largo de su vida de servicio en la carretera. Proceso simulado por un dispositivo de envejecimiento por presión (PAV),

El grado de comportamiento de un asfalto PG (Performance Graded) está compuesta por dos números que representan los límites de temperatura para su aplicación, por ejemplo PG XX-YY; donde el primer número (XX) es la máxima temperatura a la cual el ligante asfáltico mantiene sus propiedades durante su servicio en un pavimento (resistencia a la deformación), mientras que el segundo número (YY) indica la mínima temperatura a la cual el asfalto posee adecuadas propiedades físicas para su servicio (resistencia al agrietamiento térmico, correlacionable, para asfaltos no modificados, con la resistencia al agrietamiento por fatiga).

Los ligantes usados en este proyecto de investigación fueron suministrados por RECOPE. Tanto el ligante AC30 como el ligante PG70(22) provienen de una misma fuente de petróleo crudo (Boscan, Venezuela) y fueron muestreados por el personal de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica (LANAMME) los días 10 de mayo y 12 de junio del 2002 respectivamente: se emplearon estos dos ligantes base, así como el ligante AC30 modificado con SBS (Solprene S-411) al 2.5% para obtener un tercer ligante. El modificante SBS fue suministrado por la empresa Dynasol. El proceso de modificación fue realizado en las instalaciones del LANAMME por personal técnico capacitado.

2.2.1. Procedimientos de envejecimiento de los ligantes asfálticos

2.2.1.1. Horno Rotatorio de película delgada (RFTO)

Envejece una muestra de ligante en condición original, con el fin de determinar la masa de volátiles que pierde el ligante durante el proceso de mezclado y construcción. Proceso que se realiza mediante un calentamiento durante 85 minutos a 163°C e inyección de aire.

2.2.1.2. Cámara de Envejecimiento por presión (PAV)

El PAV realiza el envejecimiento a una presión 2070 kPa y a una temperatura de 90°C, 100°C o 110°C (dependiendo de si la zona climática es fría, moderada o cálida) durante 20 horas; se utiliza la muestra que previamente fue envejecida en el RTFO; es

decir que los ensayos son acumulativos. Permite simular el envejecimiento a lo largo de su vida de servicio (5 a 10 años dependiendo de las condiciones de la capa compactada).

2.2.2. Ensayos físicos y reológicos

2.2.2.1. Viscosímetro Rotacional (RV)

Mide la viscosidad del ligante asfáltico a temperaturas altas e intermedias (superiores a 100°C) con el fin de asegurar un buen manejo durante los procesos de bombeo y mezclado; y con el fin de trazar las curvas de consistencia versus temperatura, para selección de temperaturas de mezclado y compactación.

2.2.2.2. Reómetro de Corte Dinámico (DSR)

El DSR permite medir las propiedades viscoelásticas del ligante asfáltico; separándolas en dos grupos de propiedades: blando versus rígido, elástico versus plástico. Mediante esta prueba se determina el Módulo Complejo de Cortante (G^*) y el ángulo de fase (δ). $G^* / \sin(\delta)$ es una medida de la resistencia total del ligante a la deformación cuando es expuesto a ciclos repetidos de esfuerzo cortante. “ δ ” por su parte es un indicativo de que tan viscoso o elástico es una asfalto a cierta temperatura.

2.2.2.3. Reómetro de vigas a flexión (BBR)

Estudia el comportamiento del asfalto a bajas temperaturas, determina la temperatura más baja a la cual el asfalto puede funcionar sin que haya agrietamiento por fragilidad (en condiciones extremas de temperaturas bajas).

2.2.2.4. Ensayo de Tracción Directa (DTT)

Igualmente estudia el grado de fragilidad del asfalto a bajas temperaturas. En el ensayo se aplica tracción en una muestra hasta la rotura registrando la deformación de falla en términos porcentuales de la longitud inicial. Permite valorar si la condición de falla cuantificada con el reómetro de vigas a flexión se asocia con una condición de falla frágil.

2.2.3. Características de los Ligantes Asfálticos

La Tabla 2.9 muestra las propiedades físicas de los ligantes asfálticos del proyecto. La Tabla 2.10 muestra los resultados obtenidos para evaluar la susceptibilidad térmica y la susceptibilidad al envejecimiento.

Tabla 2.9. Propiedades físicas de los ligantes asfálticos.

Estado de envejecimiento	Propiedad	Unidad	Ligante Asfáltico		
			AC30	AC30+2.5% SBS	PG70(22)
Original	Densidad a 25°C	g/cm ³	1.024	1.028	1.031
	Penetración a 15°C	1/100 mm	28	25.6	21.8
	Penetración a 25°C	1/100 mm	84	65	62
	Penetración a 35°C	1/100 mm	234	158	164
	Viscosidad absoluta a 60°C	Poise	2460	6053	3691
	Viscosidad cinemática a 125°C	centi Poise	920	1970	1204
	Viscosidad cinemática a 135°C	centi Poise	541	1160	716
	Viscosidad cinemática a 145°C	centi Poise	346	740	447
RTFO	Viscosidad absoluta a 60°C	Poise	5807	11470	10300

*Fuente: Referencias 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7.

Tabla 2.10. Susceptibilidad térmica y al envejecimiento de los ligantes asfálticos.

Propiedad	Unidad	Ligante Asfáltico		
		AC30	AC30+2.5% SBS	PG70(22)
Razón de viscosidad (60°C)	----	2.36	1.89	2.79
Pérdida de masa en RTFO	%	0.475	0.312	0.978
Índice de Penetración (25°C)	----	-1.14	-0.08	-0.82
Índice VTS	----	3.04	2.72	3.07

*Fuente: Referencias 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7.

El ligante asfáltico AC30 modificado con SBS presenta menor susceptibilidad al envejecimiento y menor susceptibilidad térmica que el AC 30 sin modificar y el PG70.

En la Tabla 2.11 se presenta el grado de desempeño y las propiedades por medio del reómetro dinámico de cortante a varios escenarios de envejecimiento.

Tabla 2.11. Grado de desempeño de los Ligantes Asfálticos.

Estado de envejecimiento	Temperatura	Parámetro	Unidad	Ligante Asfáltico		
				AC30	AC30+2.5% SBS	PG70(22)
Original	58°C	G*/sen(□)	kPa	3.156	8.275	4.710
		δ	°	82.1	60.4	80.3
	70°C	G*/sen(□)	kPa	0.732	4.246	1.036
		□	°	85.4	73.0	84.5
	82°C	G*/sen(□)	kPa	0.243	0.502	0.306
		□	°	88.4	85.3	86.6
RTFO	58°C	G*/sen(□)	kPa	7.907	15.293	13.335
		□	°	76.5	68.6	84.4
	70°C	G*/sen(□)	kPa	1.793	3.886	3.033
		□	°	81.4	76.9	79.0
	82°C	G*/sen(□)	kPa	0.521	1.310	0.888
		□	°	85.2	81.9	83.6
PAV	16°C	G*/sen(□)	kPa	5177	6193	7133
		□	°	45.5	43.5	44.5
	22°C	G*/sen(□)	kPa	2796	3422	4452
		□	°	49.3	47.1	47.5
	28°C	G*/sen(□)	kPa	1312	1718	2176
		□	°	53.3	50.7	51.8

Grado de desempeño	Temperatura máxima original	68.19	79.87	71.13
	Temperatura máxima RTFO	68.95	76.42	73.63
	Temperatura intermedia PAV	16.5	18.15	19.99
	PG	64 (19)	76 (19)	70 (22)

*Fuente: Referencias 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7.

En la Tabla 2.11 se muestra la clasificación de los diferentes ligantes por grado de desempeño, la temperatura dentro de paréntesis es la intermedia de desempeño, que se relaciona con el agrietamiento por fatiga.

2.3. Aditivos

Los tipos de aditivos incorporados tanto al ligante como a la mezcla asfáltica de este proyecto son: relleno mineral, fibras de celulosa y elastómero (SBS).

2.3.1. Relleno Mineral

El relleno mineral se utiliza para dar mayor rigidez a la mezcla de granulometría discontinua (SMA) por incremento aparente en la viscosidad del ligante. En este caso se utilizó agregado calizo triturado y se agrega en la granulometría en lugar del material que pasa la malla No. 200.

2.3.2. Fibras de celulosa

Son fibras que aportan material con alta área superficial que permite acomodar un alto contenido de asfalto efectivo y lograr películas de asfalto más gruesas de lo normal.

Estas fibras aumentan la trabajabilidad de la mezcla, inhiben el escurrimiento del ligante y dan mayor homogeneidad al conjunto; todo esto durante la elaboración y colocación de la mezcla asfáltica. Además durante la vida de servicio dan mayor ángulo de fricción interna y cohesión en la mezcla, evitan la exudación del ligante a la superficie del pavimento, mayor resistencia a la acción del agua, a la fatiga y al envejecimiento.

La fibra de celulosa usada es el VIATOP 66 suministrado por ChemSol, S.A. (Costa Rica) y producida por la compañía J&S Rettenmaier (Alemania). Para la aplicación de esta fibra se recomienda un mínimo 0.3% por peso total de agregado, para este proyecto se usó 0.5% por peso total de agregado (PTA), con una corrección por cantidad de asfalto adicional que aporta esta fibra, de un 28% por peso de fibra (a la cantidad de asfalto calculada se le resta la aportada por la fibra).

2.3.3. Elastómeros

Se usan para obtener mezclas más resistentes a la deformación plástica ante temperaturas altas de servicio, y mezclas más elásticas a temperaturas de servicio intermedias (resistencia a la fatiga). En este caso se utilizó SBS al 2.5% por peso de ligante, solo se aplicó al ligante AC30.

3.1. Elaboración de la mezcla asfáltica

Para procesar la mezcla asfáltica se debe colocar el agregado y el asfalto en un horno a la temperatura de mezclado máxima, al menos tres horas antes de empezar a mezclar. En el caso de las mezclas discontinuas se requiere la adición de Viatop (0.5% PTA) al menos una hora antes de empezar a mezclar. El rango requerido para la temperatura de mezclado se obtiene a viscosidades entre 0.15 Pa-s y 0.19 Pa-s; en la Tabla 3.1 se muestran las temperaturas de mezclado para cada uno de los tres ligantes utilizados.

Para cada uno de los 36 tratamientos experimentales a investigar (una granulometría densa y una discontinua por agregado, con dos ligantes para la granulometría densa y uno para la discontinua, con tres niveles de deformación a la tracción controlada) era necesario hacer dos bloques de 30 cm por 43 cm de mezcla asfáltica, siendo necesario para cada uno de ellos un aproximado de 22.5 kg de agregado separados en seis partes iguales (3750 g) para llevar a cabo el mezclado.

Tabla 3.1. Temperaturas de mezclado y compactación.

Asfalto	Temperatura de mezclado		Temp de compactación	
AC30	157°C	162°C	147°C	152°C
AC30+SBS	180°C	185°C	166°C	171°C
PG70	163°C	169°C	153°C	157°C

*: Fuente referencias 1, 2, 3, 4, 5,6, 7.

Cuando el agregado y el ligante han alcanzado la temperatura deseada se inicia el proceso de mezclado. Para esto se coloca la bandeja de mezclado en una balanza y se tara la balanza; se adiciona el agregado a la temperatura de mezclado en la bandeja se toma el peso de agregado y se vuelve a tarar la balanza. El agregado debe ser acomodado de forma similar a la de un cráter, para así dosificar el ligante asfáltico.

La cantidad de ligante asfáltico óptima a dosificar fue determinada en investigaciones anteriores; así, para cada una de las granulometrías y cada una de las

fuentes de agregado se tiene un porcentaje de ligante por peso total de agregado (PTA) definido previamente; en la Tabla 3.2 se muestran los porcentajes óptimos de ligante por peso total de agregado y por peso total de mezcla (PTM).

Tabla 3.2. Porcentajes óptimos de ligante asfáltico.

Agregado	Granulometría	Asfalto	Contenido de asfalto	
			%PTA	%PTM
Belén	DGM3	AC30	5.85	5.53
Belén	DGM3	AC30+SBS	5.70	5.39
Belén	SMA3	AC30	6.67	6.25
Belén	SMA3	PG70	6.21	5.85
Guápiles	DGM3	AC30	5.71	5.40
Guápiles	DGM3	AC30+SBS	5.93	5.60
Guápiles	SMA2	AC30	6.38	6.00
Guápiles	SMA2	PG70	6.50	6.10
Cóncavas	DGM2	AC30	7.30	6.80
Cóncavas	DGM2	AC30+SBS	7.99	7.40
Cóncavas	SMA3	AC30	5.93	5.60
Cóncavas	SMA3	PG70	5.60	5.30

*: Fuente referencias 1, 2, 3, 4, 5,6, 7.

Una vez dosificado el asfalto se retira la bandeja de la balanza, y se procede a mezclar el ligante asfáltico y el agregado, utilizando una batidora mecánica hasta alcanzar un recubrimiento uniforme de las partículas de agregado.

Según lo establecido en la norma AASHTO TP8, luego del mezclado se coloca la mezcla en un molde metálico de 30 cm de ancho, 43 cm de largo y 10 cm de alto; el cual se encuentra en un horno a la temperatura de curado. Este proceso se repite en seis ocasiones para conformar la mezcla necesaria para un bloque. En la Figura 3.1 se muestra el molde metálico utilizado.

La temperatura de curado dependerá del ligante y corresponde a la temperatura de compactación definida para viscosidades del ligante de 0.25 Pa-s y 0.31 Pa-s; estas temperaturas se muestran en la Tabla 3.1. El período de curado depende del porcentaje de absorción de agua de cada una de las granulometrías utilizadas. En

términos generales, se aplicaron tiempos de curado de dos horas para los agregados con absorciones de agua inferiores al 2.8%, cuatro horas para los agregados con porcentajes de absorción mayores a 3.2%, y para valores intermedios de absorción el tiempo de curado es de tres horas. Los porcentajes de absorción de agua de cada una de las granulometrías investigadas se muestran en la Tabla 2.5.



Figura 3.1 Molde metálico para la compactación.

El curado de la mezcla simula un envejecimiento a corto plazo, proceso que existe entre la producción de la mezcla y la colocación en sitio de la mezcla asfáltica (tiempo en el silo, transporte y colocación). Además, da tiempo para que el agregado absorba asfalto y minimice la variabilidad en cálculos volumétricos.

3.2. Compactación de la mezcla asfáltica

El proceso de compactación se realiza en seguida que se cumpla el periodo de curado, lo mas rápido posible para evitar la pérdida de calor de la mezcla. La compactación de la mezcla se lleva a cabo en el compactador de tambor, que se puede observar en la Figura 3.2.

Una vez que la mezcla ha sido fabricada se debe preparar el compactador, esto es: verificar las presiones de compactación y la altura meta de compactación. La altura meta de compactación está determinada por la cantidad de agregado y asfalto de cada

bloque y por la gravedad máxima teórica de la mezcla asfáltica; un cálculo volumétrico permite determinar esta altura para un porcentaje de vacíos deseado, en este caso en el rango de 6% a 8% de vacíos. El compactador permite calibrar la altura meta de compactación; el dispositivo de calibración se muestra en la Figura 3.3.

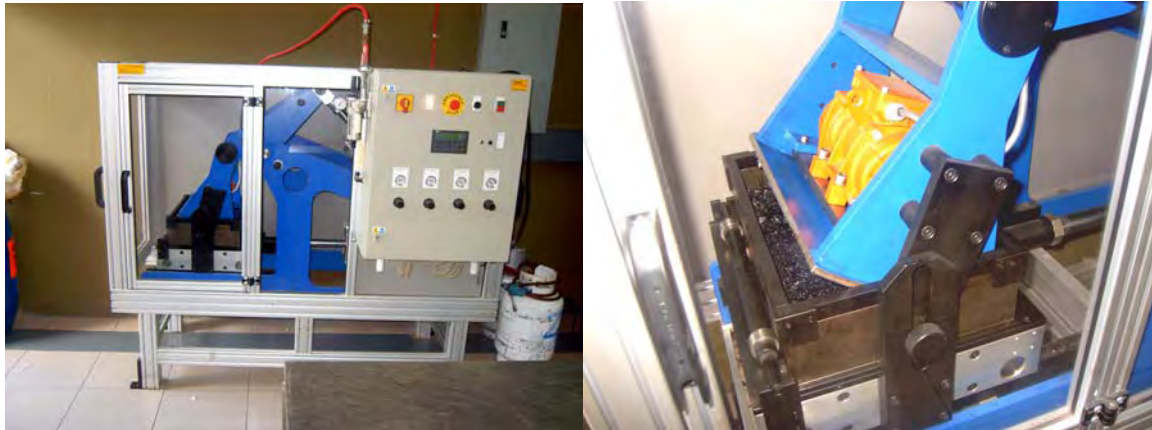


Figura 3.2. Compactador de Tambor

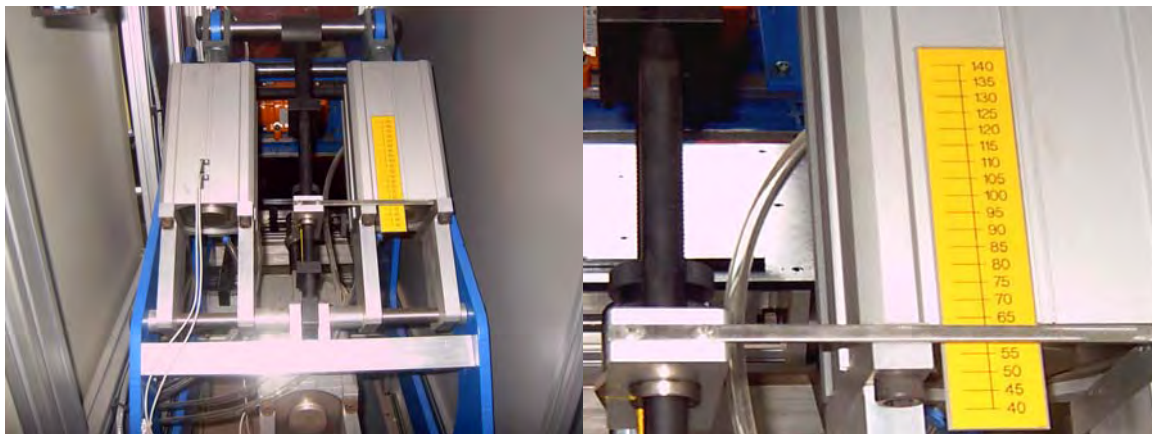


Figura 3.3. Dispositivo de calibración de altura.

Después se coloca el molde que contiene la mezcla en el compactador y se inicia el sistema de compactación, de manera que el tambor desciende y queda dentro del molde, haciendo contacto con la muestra. El compactador realiza el proceso de densificación que consta de cuatro ciclos, cada uno con un número determinado de pasadas y con una presión de compactación diferente; el compactador se detiene cuando los ciclos han terminado o cuando se alcanza la altura deseada; al terminar el

proceso se debe confirmar que la altura del bloque de mezcla compactados sea la deseada; de ser mayor, se procede a un nuevo ciclo de compactación hasta alcanzar la altura deseada.

Al terminar la compactación se retira el molde del compactador para ser colocado en un horno a 85°C durante 5 días (AASHTO TP8). Esto con el fin de simular el envejecimiento a largo plazo que tendría la mezcla asfáltica durante su vida de servicio, proceso en que se da la oxidación y rigidización del ligante asfáltico, fenómenos críticos para el agrietamiento por fatiga.

3.3. Elaboración de especímenes para el ensayo de fatiga

De cada uno de los bloques de mezcla asfáltica se obtienen cuatro especímenes o vigas, para ello el bloque se corta con una sierra eléctrica; la viga debe tener 38 cm de largo, 6.3 cm de alto y 5.0 cm de ancho.; manteniendo la cara superior del bloque de mezcla asfáltica. En la Figura 3.4 se muestra un bloque después de su envejecimiento en un horno; así como, las vigas producto del corte del bloque.

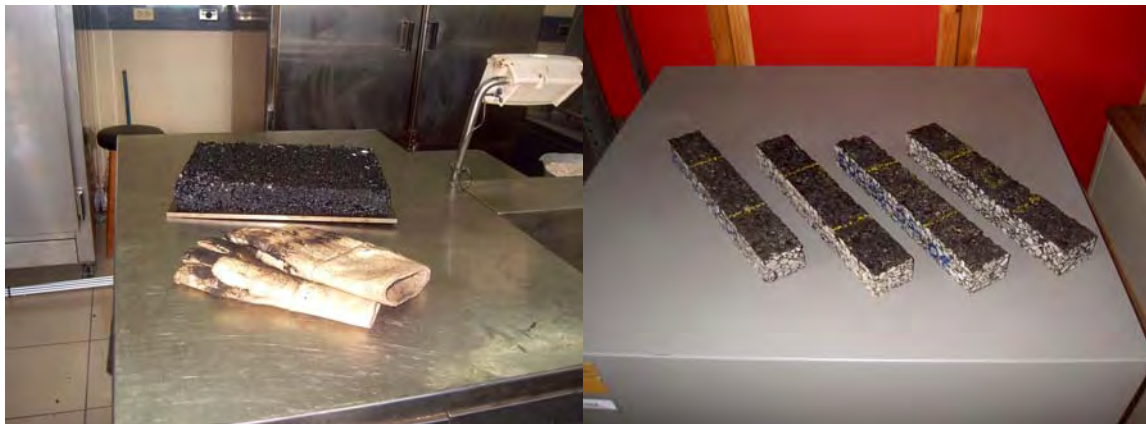


Figura 3.4. Bloque y vigas de mezcla asfáltica.

3.4. Propiedades volumétricas de mezclas asfálticas

La Tabla 3.3 muestra las propiedades objetivo para las mezclas asfálticas diseñadas de acuerdo con el método SUPERPAVE. La Tabla 3.4 muestra los datos

correspondientes a todos los diseños de mezcla valorados en este estudio por resistencia al agrietamiento por fatiga.

Tabla 3.3. Propiedades volumétrica meta.

Propiedades	DGM	SMA
Contenido de Asfalto (% PTM)	N.A.	Max 6.0
Vacios de aire (%Va)	3.0 a 5.0	3.0 a 5.0
Vacios en agregado mineral (%VMA)	mayor a 14.0	16.0-18.0
Vacios llenos con asfalto (%VFA)	65-75	70-80

*: Fuente referencias 1, 2, 3, 4, 5,6, 7.

Tabla 3.4. Propiedades volumétricas de las mezclas asfálticas.

Agregado	Granul	Asfalto	Contenido de asfalto		Asf efectivo (% x vol)	% Va	%VAM	%VFA	G mm
			%PTA	%PTM					
Belén	DGM3	AC30	5.85	5.53	8.5	4.6	13.1	65	2.418
Belén	DGM3	AC30+SBS	5.70	5.39	6.9	3.5	10.4	67	2.455
Belén	SMA3	AC30	6.67	6.25	13.0	4.8	17.8	73	2.419
Belén	SMA3	PG70	6.21	5.85	12.2	5.2	17.4	70	2.419
Guápiles	DGM3	AC30	5.71	5.40	9.1	4.0	13.1	57	2.474
Guápiles	DGM3	AC30+SBS	5.93	5.60	9.2	4.0	13.2	59	2.483
Guápiles	SMA2	AC30	6.38	6.00	12.0	4.0	16.0	76	2.444
Guápiles	SMA2	PG70	6.50	6.10	12.2	3.7	15.9	77	2.450
Cóncavas	DGM2	AC30	7.30	6.80	8.6	4.1	12.7	69	2.424
Cóncavas	DGM2	AC30+SBS	7.99	7.40	9.5	4.0	13.5	70	2.416
Cóncavas	SMA3	AC30	5.93	5.60	10.8	3.8	14.6	72	2.462
Cóncavas	SMA3	PG70	5.60	5.30	9.3	4.0	13.3	73	2.476

*: Información de los diseños de mezcla.

** : Fuente referencias 1, 2, 3, 4, 5,6, 7.

En la Tabla 3.4 se puede ver que para varias mezclas SMA se tienen contenidos de asfalto mayores al 6%, sin embargo en estos casos el escurrimiento fue menor al 0.3%, valor máximo permitido por la Norma Superpave. El escurrimiento es la parte de la mezcla (ligante asfáltico y partículas finas) que se separa de la mezcla y fluye hacia el fondo de la misma. La sensibilidad al escurrimiento es más importante en las mezclas SMA que en las mezclas densas. Esta se determina midiendo el drenaje a la temperatura anticipada de producción de mezcla asfáltica en planta. Con esta prueba se intenta simular las condiciones bajo las cuales la mezcla será producida, almacenada, transportada y colocada.

En el Apéndice 2 se muestran los datos de mezclado de cada uno de los tratamientos experimentales, así como los vacíos de aire porcentuales de cada bloque y de las respectivas vigas producto de estos bloques.

4.1. Definición

Debido a que uno de los principales modos de falla de los pavimentos asfálticos es el agrietamiento por fatiga de las capas asfálticas, la resistencia a la fatiga de la mezcla asfáltica es de mucha importancia, en cuanto a la vida útil de esta. Una de las formas de falla estructural generalmente aceptadas es precisamente el agrietamiento por fatiga en la fibra de la capa asfáltica sometida a la mayor deformación unitaria por tracción. Por lo tanto, una predicción precisa de las propiedades a fatiga de la mezcla asfáltica es de gran utilidad en la predicción de la vida del pavimento; de acuerdo con la filosofía de diseño mecanístico.

El agrietamiento por fatiga, originado en la estructura de la mezcla asfáltica, ha sido reconocido como una de las formas de falla más costosas de corregir durante el proceso de rehabilitación de la estructura del pavimento. Si la falla se extiende ampliamente, la rehabilitación podría conllevar a la necesidad remover totalmente la capa asfáltica, y si esto no se hace, el resto de capas experimentan deformación y agrietamiento en corto plazo. La falla por fatiga ocurre cuando las cargas repetidas de los vehículos generan esfuerzos de tensión de suficiente magnitud para iniciar el agrietamiento que, eventualmente, se propaga hasta la superficie. Algunos factores que contribuyen a esta forma de falla son una inadecuada estructura del pavimento (espesores inadecuados o capas de poca rigidez como estructura de soporte), malas condiciones de drenaje en las capas inferiores, densificación insuficiente de las capas de superficie que facilita la oxidación y falla frágil de la capa asfáltica, o una mezcla asfáltica con propiedades inadecuadas (susceptible a la falla por fatiga por carencia de asfalto efectivo, fragilidad, volumetría muy abierta).

Actualmente, los pavimentos asfálticos que presentan un buen desempeño en el largo plazo, tienen características que previenen el agrietamiento por fatiga. Primeramente, tienen el suficiente espesor de mezcla asfáltica para limitar los esfuerzos a la tensión en la fibra inferior de la capa asfáltica de manera que no inicie el

agrietamiento. También tienen sólidas fundaciones que soportan la estructura y amortiguan los niveles de esfuerzo y deformación plástica en las capas asfálticas. Además, la mezcla asfáltica presenta la suficiente flexibilidad para contrarrestar el inicio del agrietamiento, a bajos niveles de esfuerzo a tensión, incorporando polímeros que favorezcan dicho comportamiento.

4.1.1. Factores que afectan la capacidad a fatiga de la mezcla asfáltica

La determinación de los efectos del ligante asfáltico y el contenido de vacíos de aire en los ensayos de fatiga y resistencia a la flexo-tracción en el laboratorio determinan un paso inicial necesario en la valoración de la resistencia al agrietamiento por fatiga, puesto que a mayor contenido de asfalto efectivo y menor contenido de vacíos de aire, menos tendencia al envejecimiento de una mezcla, el cual determina la propensión a la falla por fatiga.

Sin embargo, como las propiedades volumétricas afectan significativamente la resistencia a la flexo-tracción y por tanto la vida a fatiga, la relación entre el desempeño a fatiga en experimentos de laboratorio no es necesariamente directa al desempeño en campo. Por tanto, es necesario combinar las simulaciones analíticas de las deformaciones en sitio con los modelos de fatiga generados en el laboratorio para predecir el desempeño en sitio.

4.1.1.1. Ligante asfáltico

Un incremento en el contenido de ligante asfáltico dentro de la mezcla asfáltica, determinan un incremento en el espesor de la película de ligante que recubre las partículas de agregado y un incremento en la proporción de asfalto en la sección normal a la dirección de los esfuerzos a tensión. Dado que los esfuerzos a flexo-tracción se concentran en el ligante asfáltico (ya que las partículas de agregado son mucho más rígidas), películas más gruesas significan menores esfuerzos para el ligante y menor propensión al agrietamiento.

4.1.1.2. Contenido de vacíos

Un contenido de vacíos de aire bajo tiene al menos dos efectos que contribuyen a una mayor vida a fatiga. Primero, puesto que el aire no transmite ningún esfuerzo, si se reemplaza por ligante asfáltico o agregado, se reduce el nivel de esfuerzo en dichos componentes. Segundo, un contenido de vacíos de aire bajo genera una estructura ligante-agregado más homogénea, lo que resulta en menor concentración de esfuerzos en la interfase sólido-aire.

4.1.1.3. Vacíos llenos con asfalto

Se ha encontrado que una porosidad reducida incrementa la rigidez en el corto plazo, minimizando los efectos del envejecimiento, e igualmente incrementa la resistencia a fatiga de la mezcla asfáltica. Esto generalmente se ha relacionado con los vacíos llenos de asfalto (VFA).

4.1.1.4. Película de asfalto entre agregados

Adicionalmente, la combinación del incremento en el contenido de ligante asfáltico y la reducción consecuente en los vacíos de aire, transmite los esfuerzos de tensión a través del sólido, en concentraciones reducidas, debido a los vacíos limitados y donde las partículas de agregado están en contacto directo. Las micro-grietas que empiezan a formarse bajo cargas repetitivas de carga crecen más lentamente y requieren de mayor tiempo para interconectarse debido al reducido número y contenido de vacíos de aire, que concentran esfuerzos y eventualmente permiten que las grietas se extiendan de un lado a otro.

Con el ensayo de fatiga en la viga a flexo-tracción, entre otros resultados experimentales, se pueden obtener diferentes relaciones. Algunas de ellas se muestran en la Figura 4.1; entiéndase N_f , como el número de ciclos de carga para la falla por fatiga en una mezcla asfáltica.

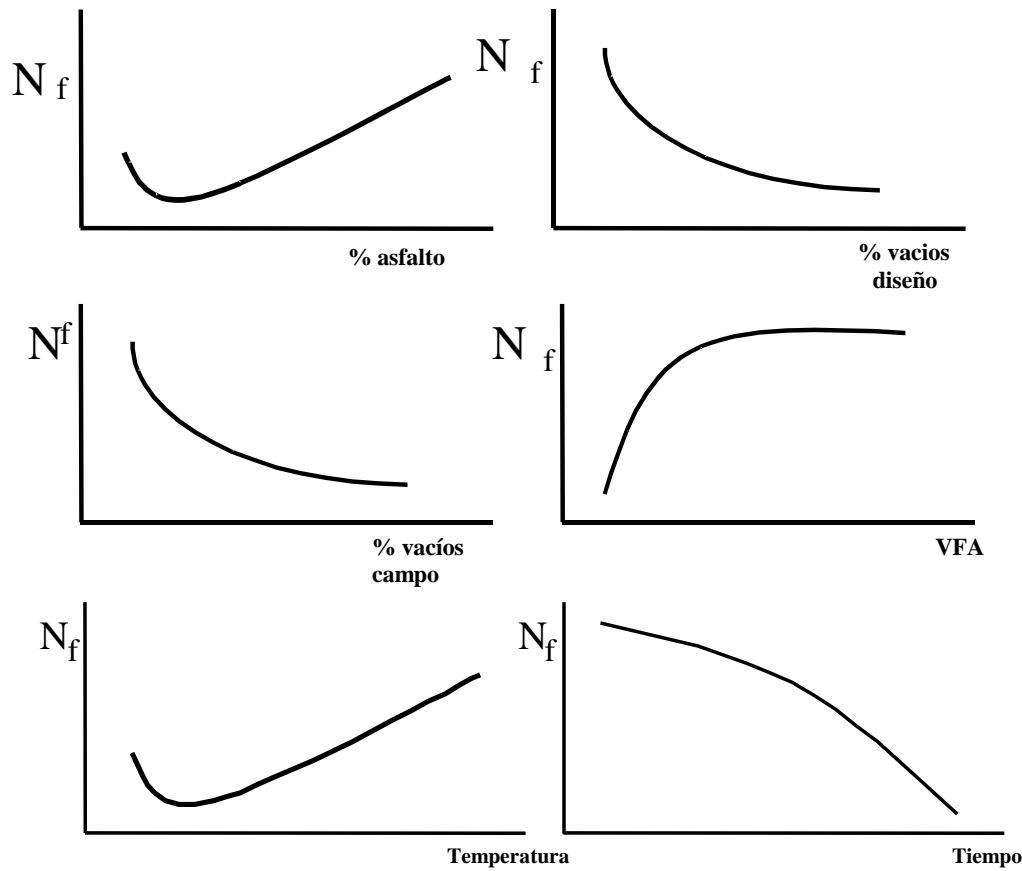


Figura 4.1. Relaciones esperadas para el ensayo a fatiga

4.2. Método de Ensayo a Fatiga

Una de las formas típicas de estimar las propiedades a fatiga de la mezcla asfáltica colocada en sitio es el ensayo a flexo-tracción o prueba de flexiones repetidas. Cargas repetidas son aplicadas en cuatro puntos de un espécimen o viga, con un rango de carga variable. Esta carga produce un momento de flexión constante sobre la porción central de la viga, y luego otra carga es aplicada en la dirección contraria forzando a la viga a regresar a su posición original para mantener la posición inicial durante el periodo de carga siguiente. La deflexión causada por la carga es medida en el centro de la viga. En la Figura 4.2 se muestra el equipo utilizado en este ensayo.



Figura 4.2. Equipo de Viga de Fatiga.

El esfuerzo y la deformación unitaria en la fibra inferior de la viga; así como, el modulo de rigidez son calculados usando relaciones básicas para esfuerzo y deformación unitaria en vigas. Las ecuaciones utilizadas son las siguientes:

$$\sigma = \frac{3aP}{bh^2} \quad \text{ec. 1}$$

$$e = \frac{12bh}{3l^2 - 4a^2} \quad \text{ec. 2}$$

$$E_s = \frac{Pa(3l^2 - 4a^2)}{(48Id)} \quad \text{ec. 3}$$

Donde:

σ = Máximo esfuerzo de tensión, N

e = Deformación unitaria, mm/mm

a = $L/3$, mm

L = luz de la viga, mm

P = carga aplicada, N

b = ancho de la viga, mm

h = altura de la viga, mm

d = deflexión de la viga en el eje neutral, mm

E_s = rigidez de la viga, Pa

I = momento de inercia de la viga, mm⁴

Dos tipos de carga controlada pueden ser aplicados en este ensayo: por esfuerzo controlado o por deformación controlada. En el ensayo con esfuerzo controlado, el esfuerzo al que se somete la viga se mantiene constante mientras la deformación incrementa con el número de repeticiones de carga. En cambio, con deformación controlada, ésta se mantiene constante y la carga o esfuerzo decrece con el número de cargas aplicadas a la viga. El uso de esfuerzo controlado tiene la ventaja que la falla ocurre más rápido y es más fácil de definir, ya que se da cuando la viga se quiebra; mientras tanto, para el modo de ensayo de deformación controlada se define un criterio de falla, en el cual el ensayo concluye cuando el módulo de rigidez de la viga es el 50% del inicial. En esta investigación se utilizó la modalidad de deformación controlada que es metodológicamente más apropiada para espesores de capa asfáltica inferiores a los 8.0 cm.

El ensayo estándar para determinar la resistencia ante la fatiga a escala de laboratorio está definido por AASHTO TP8: Determinación de la vida a fatiga de la mezcla asfáltica compactada en caliente sometida a flexo-tracción. El ensayo a flexo-tracción determina la vida a fatiga de una pequeña viga (380 mm de largo x 50 mm de espesor x 63 mm de ancho) sometiéndola a repetidos esfuerzos. El espécimen de muestra es extraído de mezcla asfáltica producida en el laboratorio o compactada en campo (ver Figura 3.4). La carga es aplicada al espécimen por un pistón capaz de aplicar una carga sinusoidal o haversiana a 10 Hz. La deflexión dinámica de la viga es medida con un deformímetro en el centro de la viga. El equipo de ensayo debe estar en una cámara térmica ya que el ensayo debe realizarse a una temperatura de 20°C. Además, se requiere de un condicionamiento previo del espécimen de 2 horas mínimo, a 20°C. En la Figura 4.3 se muestra el equipo del ensayo de fatiga en la cámara térmica.

Antes de realizarse el ensayo de fatiga a los especímenes, es necesario someter estos a un proceso de envejecimiento, en el cual las vigas se colocan en un horno a 85°C durante 5 días, este proceso simula el envejecimiento a largo plazo que tendría la mezcla asfáltica durante su vida de servicio, proceso en que se da la oxidación y rigidización del ligante asfáltico, fenómenos críticos para el agrietamiento por fatiga.



Figura 4.3. Cámara térmica y equipo de fatiga.

Los resultados generalmente se grafican para mostrar los ciclos a la falla vs. esfuerzo o deformación aplicada. Finalmente, y en términos generales, se busca determinar las leyes de fatiga para la mezcla asfáltica, con lo que se puede encontrar las deformaciones, esfuerzos y deflexiones admisibles de la mezcla. Por leyes de fatiga o funciones de transferencia se entienden las ecuaciones matemáticas que transforman deformación unitaria a la tensión con cantidad de repeticiones de carga para la falla.

4.3. Resultados de los Ensayos de Fatiga.

Los ensayos de fatiga se aplicaron a 72 especímenes, los cuales pertenecen a 36 tratamientos experimentales; se utilizaron dos tipos de mezcla (densas y discontinuas), dos tipos de ligantes (PG70 y AC30), dos aditivos para ligante (SBS y ninguno), además de tres fuentes de Agregados (La Esmeralda-Guápiles, Belén - Santa Ana, Las Cóncavas), así como tres niveles de deformación unitaria.

Tabla 4.1. Tratamientos experimentales.

Agregado	Mezcla	Asfalto	ϵ_t E-6 mm/mm
Belén	DGM	AC30	400, 500, 600
		AC30+SBS	400, 500, 600
	SMA	AC30	400, 500, 600
		PG70	400, 500, 600
Guápiles	DGM	AC30	400, 500, 600
		AC30+SBS	400, 500, 600
	SMA	AC30	400, 500, 600
		PG70	400, 500, 600
Cóncevas	DGM	AC30	400, 500, 600
		AC30+SBS	400, 500, 600
	SMA	AC30	400, 500, 600
		PG70	400, 500, 600

Para estos ensayos se utilizaron tres deformaciones unitarias por duplicado que permitieron evaluar las condiciones críticas de falla por fatiga ante altas sollicitaciones de carga. Para ello se modeló mediante un software de multicapa elástica (Everstress) un conjunto de estructuras de pavimento representativas, modelando la combinación de las diferentes condiciones: cargas de 6000 kg, 8000 kg y 10000 kg; espesores de capa asfáltica de 5 cm, 7.5 cm y 10 cm; base granular de 10 cm, 15 cm, 20 cm y 25 cm; y una sub-base de 25 cm; conformando así 36 escenarios para determinar niveles de deformación unitaria a la tracción de magnitud superior a 300 E-6 mm/mm. en la Figura 4.4 se muestra el esquema de carga utilizado.

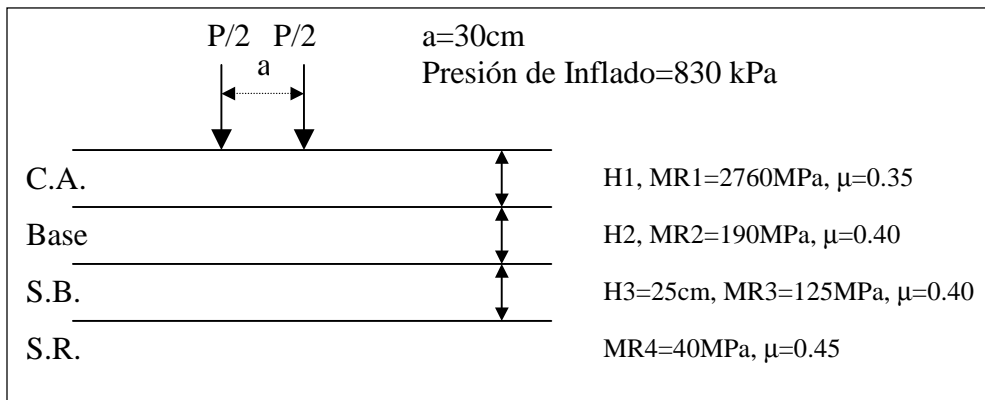


Figura 4.4. Esquema de Carga.

A partir de esta modelación se escogieron los valores de deformación mostrados en la Tabla 4.1 (400 E-6 mm/mm, 500 E-6 mm/mm y 600 E-6 mm/mm), esto por ser valores frecuentes y estar dentro del rango de los resultados obtenidos en las corridas realizadas mediante la modelación mecánica. Los resultados de deformación de las corridas se muestran en la Tabla 4.2.

Además los resultados de los ensayos de fatiga realizados para cada uno de los tratamientos experimentales se muestran en las Tablas 4.3, 4.4 y 4.5, separados por fuente de agregado. Así como, en las Figuras 4.5, 4.6 y 4.7, donde se muestran estos resultados gráficamente, incluyendo las respectivas curvas de ajuste de estos.

Tabla 4.2. Resultados de deformación unitaria crítica en las capas asfálticas de superficie. Modelación por medio de EverStress.

Corrida	P (N)	H1 (cm)	H2 (cm)	Def (0,0) E-6 mm/mm	Def (15,0) E-6 mm/mm	Def (0,15) E-6 mm/mm	Def (15,15) E-6 mm/mm
1	60000	5	10	645	570	221	72
2			15	614	536	206	82
3			20	599	519	197	89
4			25	590	510	193	93
5		7.5	10	579	556	232	62
6			15	553	528	216	48
7			20	537	510	205	75
8			25	527	500	198	31
9		10	10	490	487	226	115
10			15	469	464	211	100
11			20	456	450	201	89
12			25	446	440	193	81
13	80000	5	10	686	718	276	79
14			15	647	676	256	92
15			20	627	653	245	100
16			25	616	641	238	105
17		7.5	10	663	703	297	93
18			15	630	666	275	73
19			20	609	644	261	59
20			25	596	630	251	50
21		10	10	582	619	294	161
22			15	555	589	274	140
23			20	537	570	260	126
24			25	525	557	250	115
25	100000	5	10	711	838	320	80
26			15	665	787	295	93
27			20	640	760	281	101
28			25	626	745	272	107
29		7.5	10	732	829	357	130
30			15	691	784	330	104
31			20	665	756	311	86
32			25	649	739	300	74
33		10	10	662	735	360	210
34			15	628	699	335	185
35			20	606	675	317	167
36			25	591	659	304	154

Nota: se indican en la tabla las deformaciones unitarias a la tracción críticas.

Tabla 4.3. Resultados del ensayo de fatiga para Agregado de Belén.

DGM3 AC30		DGM3 AC30+SBS		SMA3 AC30		SMA3 PG70	
Deformación	Nf	Deformación	Nf	Deformación	Nf	Deformación	Nf
400	293580	400	250390	400	277080	400	270040
400	78330	400	184430	400*	125300	400	167030
500	64490	500	47990	500	172100	500	39120
500	45670	500	41150	500	166550	500	35640
600*	43520	600	17000	600	78360	600	15790
600	8370	600	12280	600	39520	600	13350

*: Estos fueron eliminados por presentar una dispersión alta.

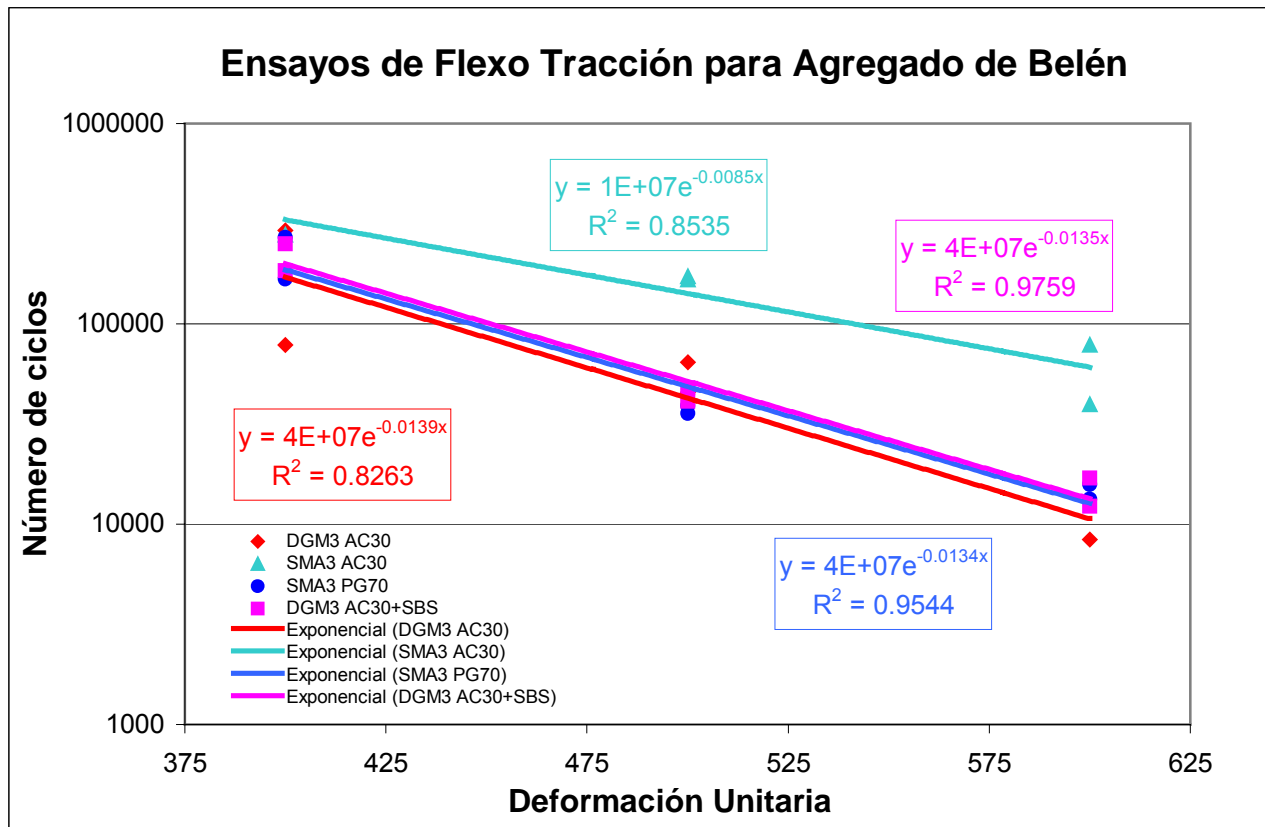


Figura 4.5. Resultados del ensayo de fatiga para Agregado de Belén.

Tabla 4.4. Resultados del ensayo de fatiga para Agregado de Guápiles.

DGM3 AC30		DGM3 AC30+SBS		SMA2 AC30		SMA2 PG70	
Deformación	Nf	Deformación	Nf	Deformación	Nf	Deformación	Nf
400	220840	400	244470	400	294670	400	162130
400	136360	400	110770	400	177480	400	156990
500	66680	500	44980	500	84600	500*	287680
500	64320	500	28420	500	84510	500	133470
600	11740	600	12820	600	42100	600	49800
600	11430	600	10990	600	38330	600	48970

*: Estos datos fueron eliminados por presentar una dispersión alta.

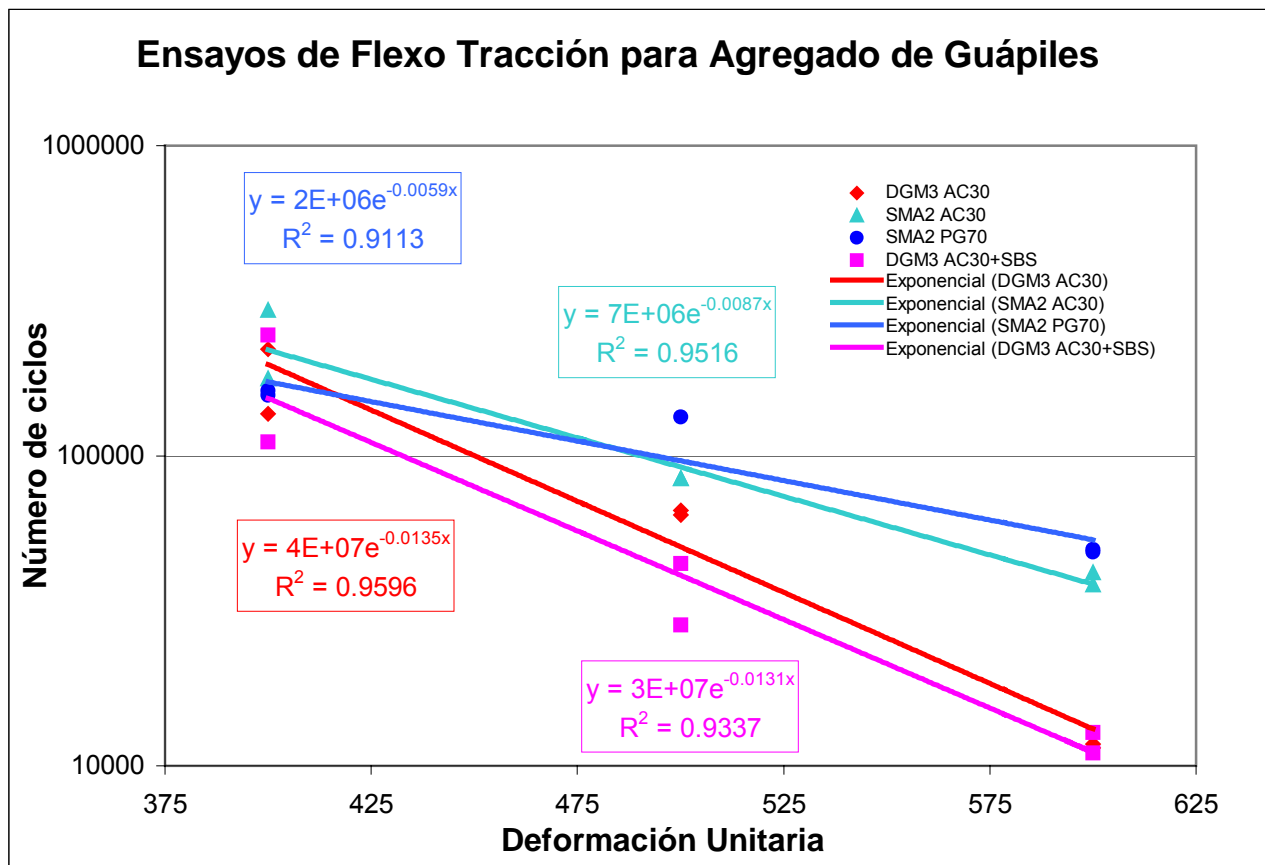


Figura 4.6. Resultados del ensayo de fatiga para Agregado de Guápiles.

Tabla 4.4. Resultados del ensayo de fatiga para Agregado de Las Cóncavas.

DGM AC30		DGM AC30+SBS		SMA AC30		SMA PG70	
Deformación	Nf	Deformación	Nf	Deformación	Nf	Deformación	Nf
400	1320360	400	3345850	400	562770	400	248970
400	566730	400	1375450	400	229120	400	183880
500	307180	500	357190	500	138460	500	71210
500	131440	500	214690	500	104320	500	40500
600	44660	600*	172030	600	56220	600	18980
600	22110	600	43970	600	37950	600	13690

*: Estos datos fueron eliminados por presentar una dispersión alta.

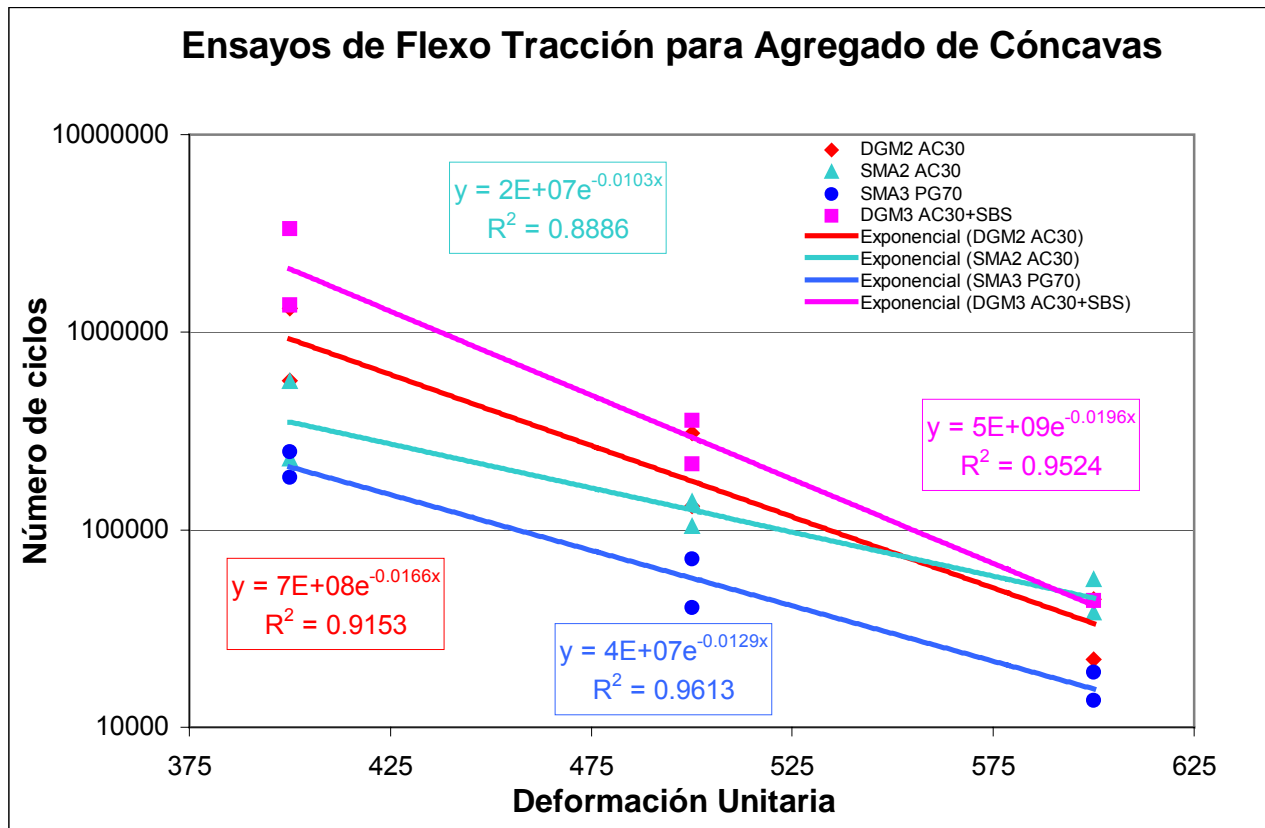


Figura 4.7. Resultados de fatiga para Agregado de Las Cóncavas.

Para los resultados de fatiga del agregado de Belén los coeficientes de correlación para cada tratamiento experimental no disminuyen de 0.82, lo que indica la tendencia lineal que presentan los datos, además se presenta un cierto paralelismo entre cada tratamiento experimental con un desplazamiento hacia arriba en la gráfica del tratamiento de mezclas SMA con asfalto AC30, mientras que los restantes tratamientos muestran curvas más cercanas entre sí.

En los resultados obtenidos de los ensayos a fatiga aplicados a las mezclas con agregado de Guápiles, los coeficientes de correlación son mayores a 0.91, pero en este caso las mezclas SMA tanto con asfalto AC30 como con PG70 se entrecruzan, ya que estos ensayos presentaron mayor número de ciclos para la falla por fatiga para deformaciones de $600E-6$ mm/mm , mientras que para deformaciones de $400E-6$ mm/mm los cuatro tratamientos experimentales presentaron resultados mas cercanos entre sí.

Los resultados correspondientes al agregado de Las Cóncavas. al igual que los restantes presentan coeficientes de correlación cercanos a uno (mayores a 0.88), para este caso las curvas no muestran paralelismo entre si, por el contrario se presenta un entrecruzamiento de las curvas, esto debido a la mayor dispersión de los resultados antes deformaciones bajas ($400E-6$ mm/mm).

Los modelos de desempeño usados actualmente para el diseño de las estructuras viales han sido desarrollados en otros países bajo condiciones ideales para los mismos, que en su mayoría no se asemejan a las que vivimos en este país, por lo que aunque se quiera diseñar un pavimento de la mejor manera, no se están aplicando las mejores herramientas; lo que podría disminuir grandemente la vida útil de los mismos.

Por esto es necesario evaluar algunos de los modelos disponibles actualmente a nivel internacional tales como PDMAP y Shell, y ajustarlos a las condiciones tanto de cargas como de materias primas utilizadas en nuestro país. En este capítulo se desarrollan modelos de agrietamiento por fatiga para el concreto asfáltico de Costa Rica que se ajustan a las necesidades y características de nuestro país.

Además se asocian las condiciones de sollicitación real y las características particulares de cada estructura de pavimento con las repeticiones de carga para la falla, así como, valores de correlación entre los modelos generados y los modelos internacionales.

5.1. Correlación de propiedades físico-mecánicas y la resistencia a la fatiga

Mediante el análisis de varianza se evalúa el cambio de una variable respuesta debido a fuentes de variación entre unidades de observación. Los modelos del análisis de varianza planteados en este capítulo permiten evaluar el efecto individual y conjunto de variables independientes (fuente de agregado, tipo de mezcla, %VMA, deformación unitaria) sobre un parámetro de desempeño (repeticiones para la falla por fatiga para el concreto asfáltico). El análisis de variancia es una técnica estadística que permite valorar el peso relativo de diferentes variables o conjuntos de variables para explicar las diferencias en una variable respuesta de interés; se compara la variabilidad explicada por cada variable o conjunto de variables con respecto al error de estimación (para lo cual se requieren réplicas, es decir observaciones donde en teoría no debería

haber diferencias en las variables respuesta pues hay coincidencia de todos los factores experimentales.

Los factores que intervienen en el presente análisis son:

- Fuente de Agregado:
 1. Belén (B)
 2. Las Cóncavas (C)
 3. Guápiles (G)
- Tipo de Mezcla:
 1. Densa y AC30 (DAC)
 2. Densa y AC30+SBS (DAS)
 3. SMA y AC30 (SAC)
 4. SMA y PG70 (SPG)
- %VMA:
 1. %VMA<14% (Bajo)
 2. $14\% \leq \%VMA \leq 16\%$ (Medio)
 3. %VMA>16% (Alto)
- Deformación unitaria
 1. 400 E-6 mm/mm (B)
 2. 500 E-6 mm/mm (M)
 3. 600 E-6 mm/mm (A)

El objetivo es determinar si los efectos individuales, así como las interacciones entre ellos, afectan de manera significativa la vida a fatiga de una mezcla asfáltica, entendiendo como vida a la fatiga el número de ciclos de carga para la falla del concreto asfáltico en los términos asumidos por la prueba estándar. Para ello, se plantea la siguiente hipótesis:

H_0 : Los factores fuente, tipo, VMA, y deformación no son significativos para explicar las diferencias en el número de ciclos para la falla por fatiga.

H_1 : Los factores fuente, tipo, VMA, y deformación son significativos para explicar las diferencias en el número de ciclos para la falla por fatiga.

En el Apéndice 3 se muestran las 68 observaciones analizadas y el resultado obtenido del análisis excluyendo los factores o las interacciones que no son significativas ($p > 0.20$). Estas tablas contienen las fuentes de variación, las sumas de cuadrados, los grados de libertad (gl), las medias cuadráticas, los estadísticos F y los niveles críticos (P) asociados a cada estadístico F.

En la Tabla 5.1 se muestran cuáles variables o interacciones de ellas son significativas para explicar el número de ciclos para la falla por fatiga.

Tabla 5.1. Variables significativas.

Factor	P	Significancia
Fuente	0.0004	Si
Tipo	0.0173	Si
Deformación	<.0001	Si
Fuente*Tipo	0.0016	Si
Fuente*Deformación	0.0015	Si
Tipo*Deformación	0.0371	Si
Fuente * Tipo*Deformación	0.0316	Si
$R^2=0.830$		

Además se valoró si existe una diferencia significativa entre la estimación de los ciclos para la falla por fatiga de diferentes parámetros, combinando la fuente del agregado y el tipo de mezcla para una deformación dada. Para lo cual, se planteó la siguiente hipótesis:

H_0 : Los factores fuente y tipo no son significativos para explicar las diferencias en el número de ciclos para la falla por fatiga bajo una deformación dada.

H_1 : Los factores fuente y tipo son significativos para explicar las diferencias en el número de ciclos para la falla por fatiga bajo una deformación dada.

En la Tabla 5.2 se muestran los resultados obtenidos para este análisis, se consideró una diferencia no significativa para $p > 0.20$.

Tabla 5.2. Diferencias significativas entre distintas combinaciones de niveles de factores experimentales.

Parámetro	Diferencia Estimada	P	Difer Signif	Parámetro	Diferencia Estimada	P	Difer Signif
DAC VS DAS	-165588.75	0.0924	Si	LAS CONCAVAS-DGAS VS GUAPILES-DGAS @BAJA	2183005.00	<.0001	Si
DAC VS SAC	57703.17	0.5497	No	BELEN-DGAS VS LAS CONCAVAS-DGAS @MEDIA	-241370.00	0.3809	No
DAC VS SPG	88711.49	0.3598	No	BELEN-DGAS VS GUAPILES-DGAS @MEDIA	7870.00	0.9771	No
DAS VS SAC	223291.91	0.0257	Si	LAS CONCAVAS-DGAS VS GUAPILES-DGAS @MEDIA	249240.00	0.3657	No
DAS VS SPG	254300.24	0.0120	Si	BELEN-SMAC VS LAS CONCAVAS-SMAC @ALTA	11855.00	0.9655	No
SAC VS SPG	31008.33	0.7475	No	BELEN-SMAC VS GUAPILES-SMAC @ALTA	18725.00	0.9455	No
STA ANA VS LAS CONCAVAS	-307058.01	0.0008	Si	LAS CONCAVAS-SMAC VS GUAPILES-SMAC @ALTA	6870.00	0.9800	No
STA ANA VS GUAPILES	-11043.67	0.8952	No	BELEN-SMAC VS LAS CONCAVAS-SMAC @BAJA	-368165.00	0.2767	No
LAS CONCAVAS VS GUAPILES	296014.35	0.0010	Si	BELEN-SMAC VS GUAPILES-SMAC @BAJA	-208295.00	0.5357	No
BELEN-DGAC VS LAS CONCAVAS-DGAC @ALTA	-25015.00	0.9405	No	LAS CONCAVAS-SMAC VS GUAPILES-SMAC @BAJA	159870.00	0.5603	No
BELEN-DGAC VS GUAPILES-DGAC @ALTA	-3215.00	0.9923	No	BELEN-SMAC VS LAS CONCAVAS-SMAC @MEDIA	47935.00	0.8610	No
LAS CONCAVAS-DGAC VS GUAPILES-DGAC @ALTA	21800.00	0.9365	No	BELEN-SMAC VS GUAPILES-SMAC @MEDIA	84770.00	0.7570	No
BELEN-DGAC VS LAS CONCAVAS-DGAC @BAJA	-757590.00	0.0088	Si	LAS CONCAVAS-SMAC VS GUAPILES-SMAC @MEDIA	36835.00	0.8930	No
BELEN-DGAC VS GUAPILES-DGAC @BAJA	7355.00	0.9786	No	BELEN-SMPG VS LAS CONCAVAS-SMPG @ALTA	-1765.00	0.9949	No
LAS CONCAVAS-DGAC VS GUAPILES-DGAC @BAJA	764945.00	0.0083	Si	BELEN-SMPG VS GUAPILES-SMPG @ALTA	-34815.00	0.8988	No
BELEN-DGAC VS LAS CONCAVAS-DGAC @MEDIA	-164230.00	0.5497	No	LAS CONCAVAS-SMPG VS GUAPILES-SMPG @ALTA	-33050.00	0.9039	No
BELEN-DGAC VS GUAPILES-DGAC @MEDIA	-10420.00	0.9696	No	BELEN-SMPG VS LAS CONCAVAS-SMPG @BAJA	2110.00	0.9939	No
LAS CONCAVAS-DGAC VS GUAPILES-DGAC @MEDIA	153810.00	0.5752	No	BELEN-SMPG VS GUAPILES-SMPG @BAJA	58975.00	0.8295	No
BELEN-DGAS VS LAS CONCAVAS-DGAS @ALTA	-29330.00	0.9303	No	LAS CONCAVAS-SMPG VS GUAPILES-SMPG @BAJA	56865.00	0.8355	No
BELEN-DGAS VS GUAPILES-DGAS @ALTA	2735.00	0.9920	No	BELEN-SMPG VS LAS CONCAVAS-SMPG @MEDIA	-18475.00	0.9462	No
LAS CONCAVAS-DGAS VS GUAPILES-DGAS @ALTA	32065.00	0.9238	No	BELEN-SMPG VS GUAPILES-SMPG @MEDIA	-96090.00	0.7746	No
BELEN-DGAS VS LAS CONCAVAS-DGAS @BAJA	-2143215.00	<.0001	Si	LAS CONCAVAS-SMPG VS GUAPILES-SMPG @MEDIA	-77615.00	0.8170	No
BELEN-DGAS VS GUAPILES-DGAS @BAJA	39790.00	0.8845	No				

5.2. Modelos de Regresión

Mediante el análisis de regresión se evalúa el cambio de una variable respuesta debido a una variación de otras variables independientes. Los modelos generados permiten evaluar cuantitativamente el efecto individual de cada variable independiente (fuente de agregado, tipo de mezcla, %VMA, deformación unitaria) sobre el desempeño de una mezcla asfáltica en cuanto a repeticiones para la falla por fatiga.

Se generó un modelo en el cual se consideraron todos los tipos de mezclas, tanto las densas como las mezclas SMA. La información del modelo generado para todas las mezclas se presenta en la Tabla 5.3. Las variables que se muestran son las que presentan significancia en la estimación de la vida a fatiga. Entiéndase como significancia la facultad de una variable o combinaciones de variables de explicar mayor variabilidad que el error de estimación del modelo.

Tabla 5.3. Información de modelo de regresión para todas las mezclas.

Variable	Parámetro Estimado	Error Estándar	P
Intercepción	-116.656	83.098	0.1652
Lg Def	21.053	13.43	0.1212
Lg MR	19.582	9.89	0.052
Lg Def * Lg MR	-3.208	1.595	0.0486
R ² =0.626		R ² ajustado=0.6084	

El modelo generado es el siguiente:

$$\ln(N_f) = -116.656 + 21.053\ln(Def) + 19.582\ln(MR) - 3.208\ln(Def) * \ln(MR)$$

donde:

N_f = número de ciclos para la falla

Def = deformación unitaria en la fibra extrema de la capa asfáltica ($E-6^{mm}/mm$)

MR = módulo de rigidez de la mezcla asfáltica (MPa)

También se generaron dos modelos más, tomando en cuenta sólo un tipo de mezcla para cada uno (uno para mezclas densas y otro mezclas SMA) por separado.

La información del modelo para mezclas densas se presenta en la Tabla 5.4, mientras que la correspondiente para las mezclas SMA se muestra en la Tabla 5.5.

Tabla 5.4. Información de modelo de regresión para mezclas densas.

Variable	Parámetro Estimado	Error Estándar	P
Intercepción	-191.702	94.070	0.0505
Lg Def	-7.279	0.875	<.0001
Lg MR	57.713	21.713	0.0125
(Lg MR) ²	-3.349	1.258	0.0124
R ² =0.7271		R ² ajustado=0.6999	

Tabla 5.5. Información de modelo de regresión para mezclas SMA.

Variable	Parámetro Estimado	Error Estándar	P
Intercepción	-343.78	296.291	0.2561
Lg Def	1.001	28.817	0.9725
Lg MR	110.151	60.656	0.0805
Lg VMA	-57.323	36.675	0.1297
Lg Def*Lg VMA	8.735	5.895	0.1500
Lg MR*Lg Def	-3.561	2.296	0.1326
(Lg MR) ²	-5.417	3.565	0.1402
R ² =0.7524		R ² ajustado=0.6974	

El modelo para las mezclas densas es el siguiente:

$$\ln(N_f) = -191.702 - 7.279\ln(Def) + 57.713\ln(MR) - 3.349(\ln(MR))^2$$

El modelo para las mezclas SMA es:

$$\ln(N_f) = -343.780 - 1.001\ln(Def) + 110.151\ln(MR) - 57.323\ln(VMA) + 8.735\ln(Def) * \ln(VMA) - 3.561\ln(MR) * \ln(Def) - 5.417(\ln(MR))^2$$

donde:

N_f = número de ciclos para la falla

Def = deformación unitaria en la fibra extrema de la capa asfáltica (E-6 ^{mm}/mm)

MR = módulo de rigidez de la mezcla asfáltica (MPa)

VMA = vacíos en el agregado mineral (%)

En los Tablas 5.3, 5.4 y 5.5 se muestran tanto los coeficientes de determinación como los coeficientes de determinación ajustados; el coeficiente de correlación ajustado hace un ajuste por la cantidad de variables con alto grado de correlación entre sí.

5.3. Modelos de Agrietamiento por Fatiga

Para explicar o determinar la vida de una mezcla asfáltica ante repetidos esfuerzos y deformaciones (vida a fatiga) existen modelos de agrietamiento por fatiga de aplicación internacionales, los cuales relacionan el número de ciclos de carga al cual va a ser sometido el pavimento, con la deformación unitaria en la fibra inferior de la mezcla asfáltica de la capa de ruedo provocada por un eje de carga de diseño y con el módulo de rigidez de esta mezcla.

Dentro de estos modelos, también llamados funciones de transferencia están el desarrollado por el Instituto del Asfalto, por Shell y por Finn en el conjunto de criterios de PDMAP (Métodos Probabilísticos para el Diseño de Pavimentos Asfálticos) al 10% de agrietamiento. Estos modelos son los siguientes:

$$N_f = 0.0796 * Def^{-3.291} * MR^{-0.854} \Rightarrow \text{Instituto del Asfalto}$$

$$N_f = 0.0685 * Def^{-5.671} * MR^{-2.363} \Rightarrow \text{Shell}$$

donde:

N_f = número de ciclos para la falla

Def = deformación unitaria en la fibra extrema de la capa asfáltica ($\frac{mm}{mm}$)

MR = módulo de rigidez de la mezcla asfáltica (psi)

$$Lg (N_f) = 15 .947 - 3.291 Lg (Def) - 0.854 Lg (MR) \Rightarrow PDMAP \quad (10 \%)$$

donde:

N_f = número de ciclos para la falla

Def = deformación unitaria en la fibra extrema de la capa asfáltica ($E-6^{mm}/mm$)

MR = módulo de rigidez de la mezcla asfáltica (ksi)

5.4. Modelación mecánica

Los modelos internacionales fueron establecidos para condiciones diferentes a las típicas de nuestro país, por lo que para su aplicación en el diseño de carreteras de Costa Rica es necesario el ajuste de estos, mediante los modelos generados en este estudio.

Para evaluar y comparar los diferentes modelos generados y los modelos internacionales, se utilizaron las deformaciones unitarias críticas a la tracción obtenidas de la modelación mecánica que se llevo a cabo para determinar los umbrales de deformación unitaria para el ensayo de fatiga; el diagrama de carga y escenario estructural utilizado se muestra en la Figura 4.4 y los resultados de la modelación se muestran en la Tabla 4.2.

El número de ciclos para la falla estimado, tanto con los modelos internacionales como para los generados en este estudio, se muestran en la Tabla 5.6.

Para los modelos generados en los que se toma en cuenta el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (%VMA) de la mezcla asfáltica, se utilizó un valor promedio igual a 16%. Además en los Gráficos 1 al 9 se muestran gráficamente los resultados obtenidos de cada modelo internacional versus cada modelo general.

Tabla 5.6. Predicción de los modelos de agrietamiento por fatiga.

Corrida	P (N)	H1 (cm)	MR1 (MPa)	H2 (cm)	Def E-6 mm/mm	Modelos Generados			Modelos Internacionales		
						Modelo General Nf	Modelo Densas Nf	Modelo SMA Nf	Instituto del Asfalto Nf	Shell Nf	PDMAP 10% Agrietamiento Nf
1	60000	5	2760	10	645	28486	3668	39625	41325	4900	30081
2			2760	15	614	35318	5250	45917	48597	6479	35375
3			2760	20	599	39344	6285	49444	52718	7455	38375
4			2760	25	590	42031	7017	51735	55411	8123	40335
5		7.5	2760	10	579	45630	8047	54732	58952	9038	42912
6			2760	15	553	55762	11243	62798	68575	11729	49917
7			2760	20	537	63386	13922	68564	75531	13853	54981
8			2760	25	527	68806	15963	72531	80351	15412	58490
9		10	2760	10	490	94539	27116	90181	102103	23288	74323
10			2760	15	469	114457	37299	102810	117935	29855	85848
11			2760	20	456	129398	45767	111831	129366	35015	94168
12			2760	25	446	142547	53783	119503	139159	39707	101297
13	80000	5	2760	10	718	17840	1681	28750	29038	2668	21137
14			2760	15	676	23208	2606	34432	35409	3755	25775
15			2760	20	653	26994	3353	38190	39682	4570	28885
16			2760	25	641	29270	3838	40369	42180	5076	30704
17		7.5	2760	10	703	19562	1960	30625	31127	3007	22658
18			2760	15	666	24768	2905	36002	37189	4086	27071
19			2760	20	644	28679	3710	39809	41536	4944	30235
20			2760	25	630	31567	4353	42515	44652	5600	32503
21		10	2760	10	619	34089	4949	44816	47317	6188	34443
22			2760	15	589	42344	7104	51998	55721	8202	40561
23			2760	20	570	48859	9019	57358	62071	9878	45183
24			2760	25	557	54035	10669	61458	66967	11259	48747
25	100000	5	2760	10	838	9087	546	18105	17461	1111	12711
26			2760	15	787	11952	862	21848	21469	1586	15628
27			2760	20	760	13920	1111	24253	24083	1933	17531
28			2760	25	745	15185	1285	25744	25716	2164	18719
29		7.5	2760	10	829	9526	590	18700	18093	1181	13170
30			2760	15	784	12153	886	22099	21741	1620	15826
31			2760	20	756	14244	1155	24639	24505	1991	17838
32			2760	25	739	15730	1363	26374	26410	2265	19224
33		10	2760	10	735	16107	1418	26806	26886	2336	19571
34			2760	15	699	20055	2043	31152	31717	3106	23088
35			2760	20	675	23359	2635	34585	35582	3787	25901
36			2760	25	659	25937	3137	37159	38505	4339	28029

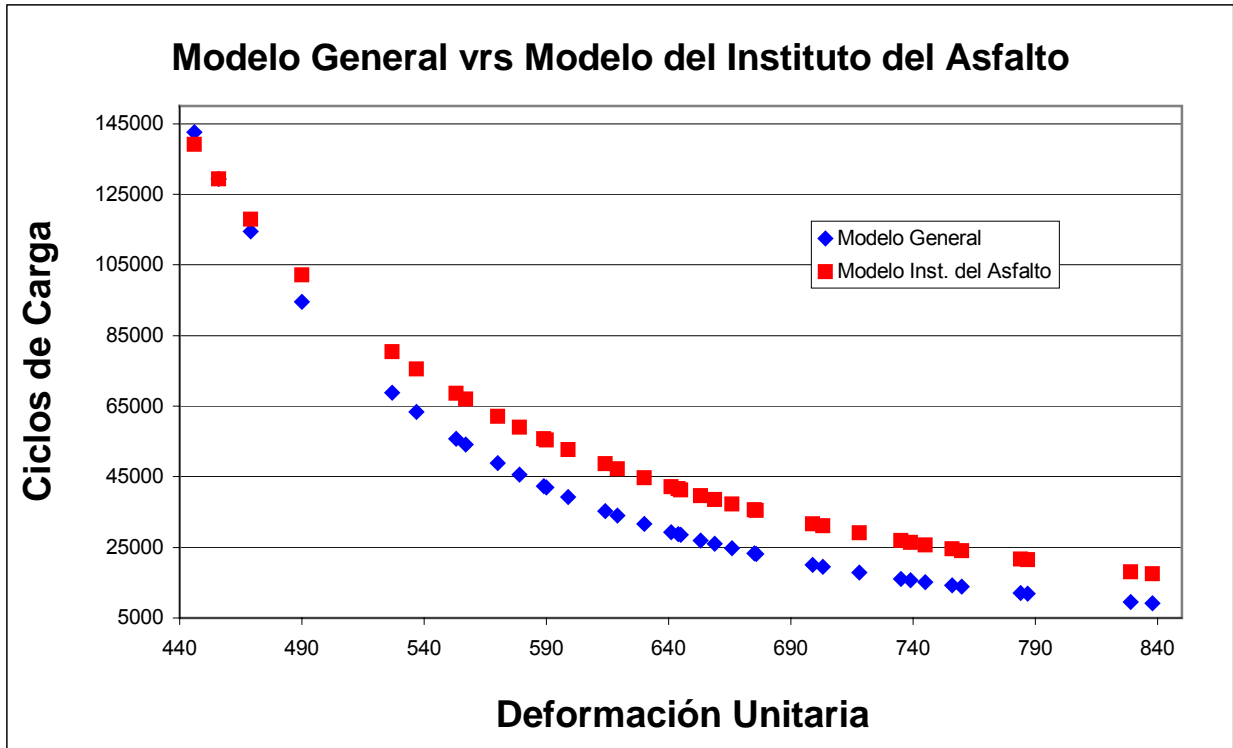


Figura 5.1. Modelo del Instituto del Asfalto vrs Modelo General.

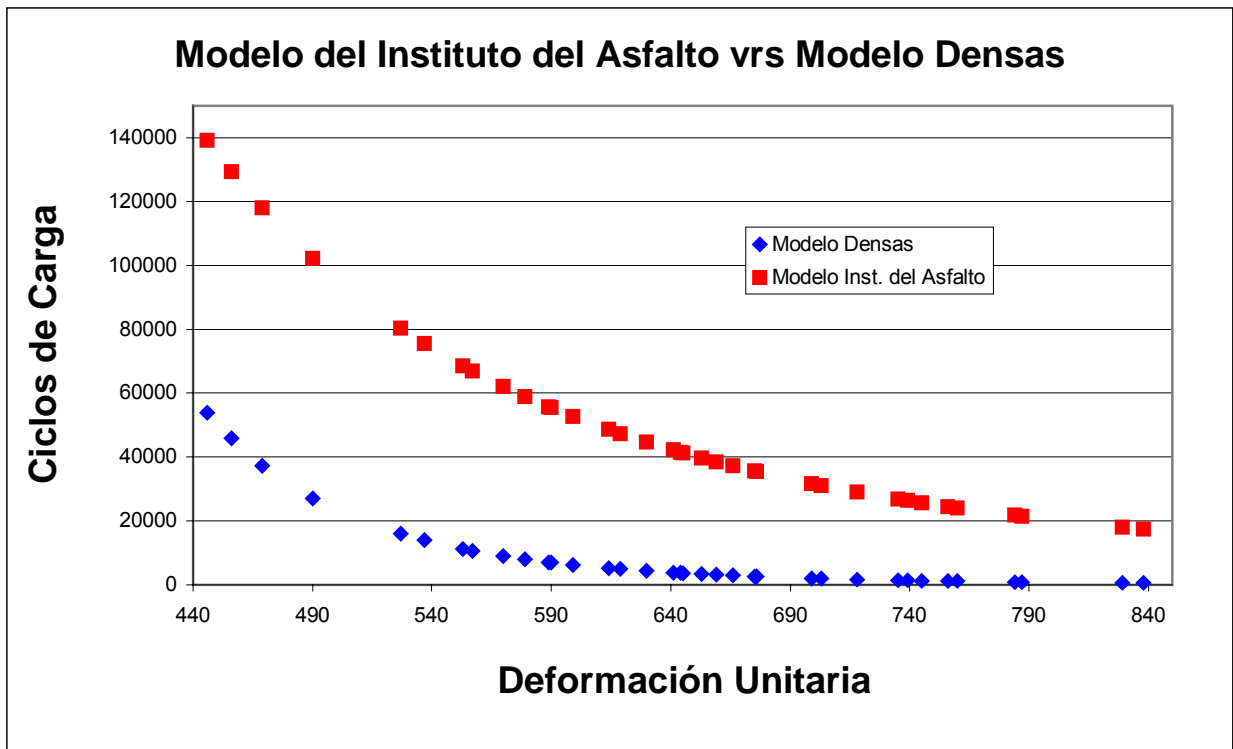


Figura 5.2. Modelo del Instituto del Asfalto vrs Modelo de Densas.

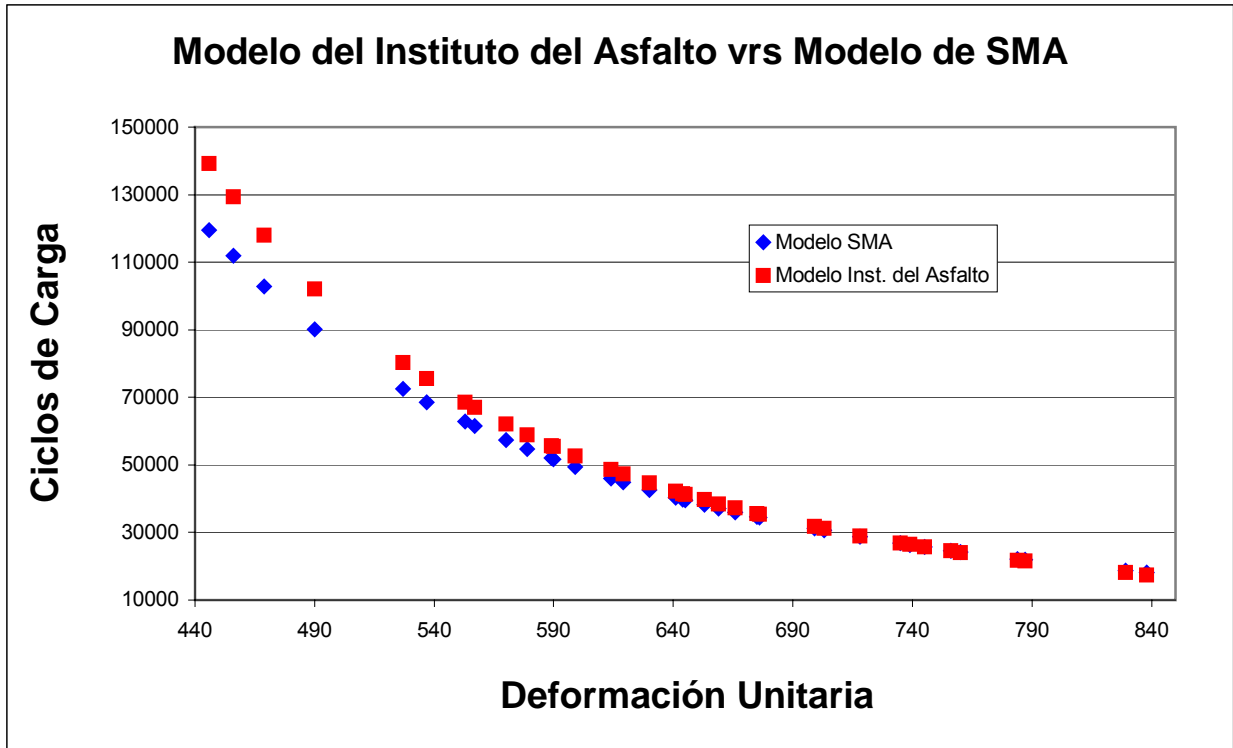


Figura 5.3. Modelo del Instituto del Asfalto vrs Modelo de SMA.

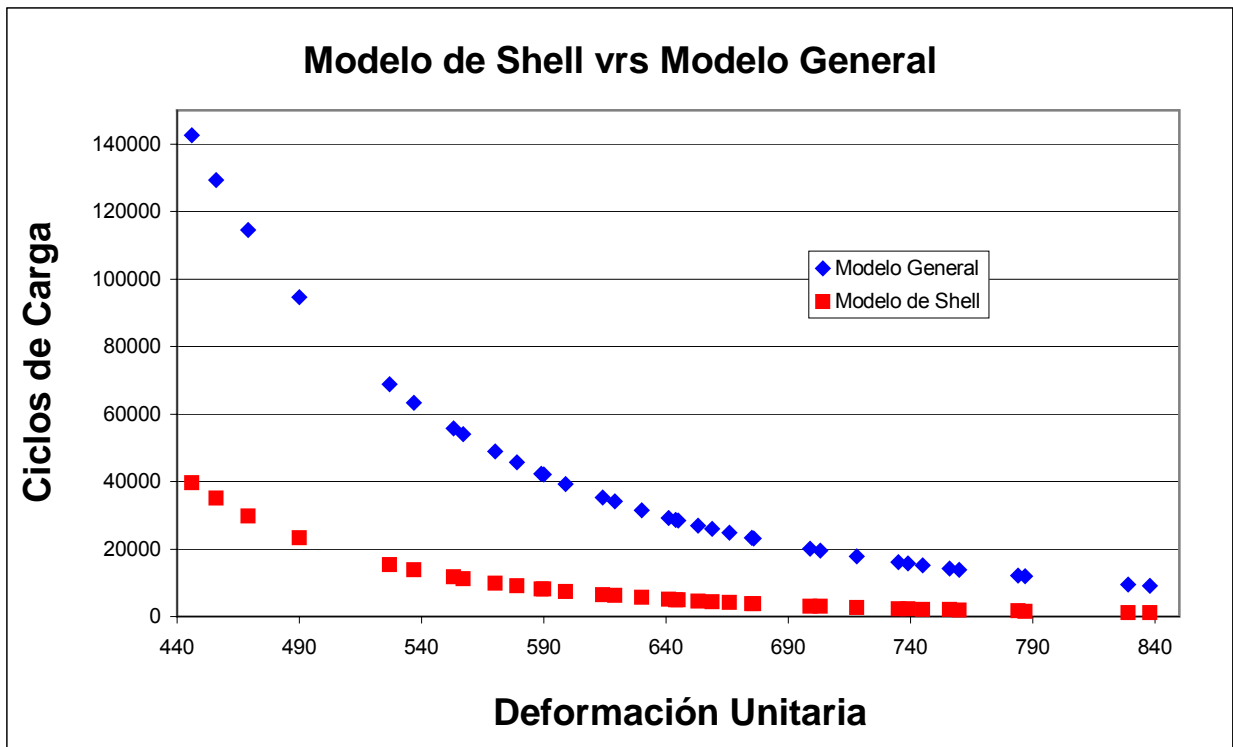


Figura 5.4. Modelo de Shell vrs Modelo General.

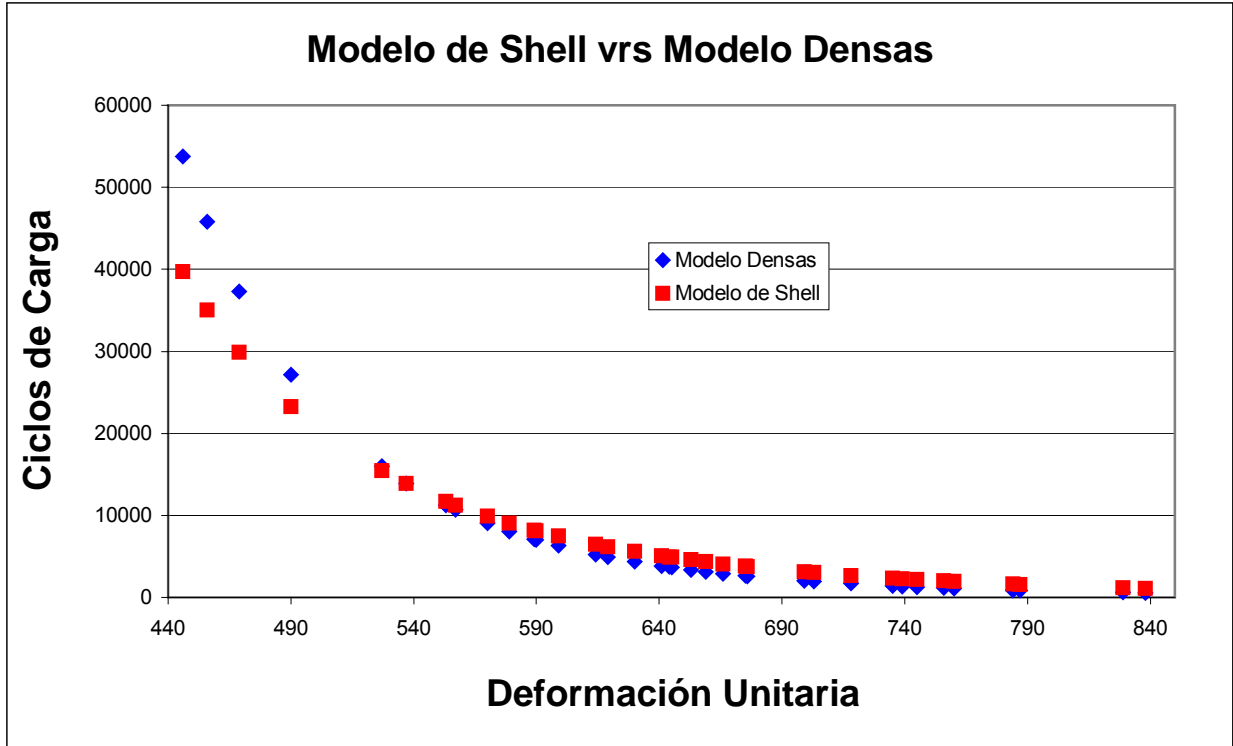


Figura 5.5. Modelo de Shell vrs Modelo de Densas.

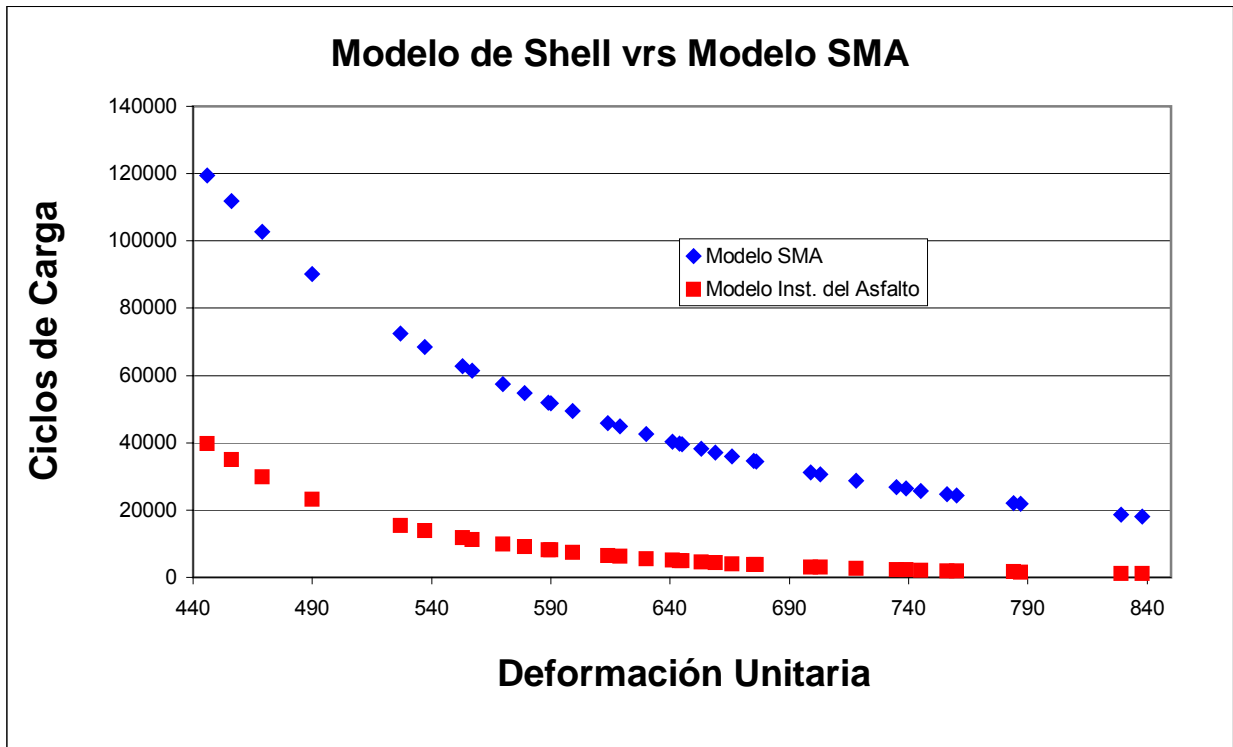


Figura 5.6. Modelo de Shell vrs Modelo de SMA.

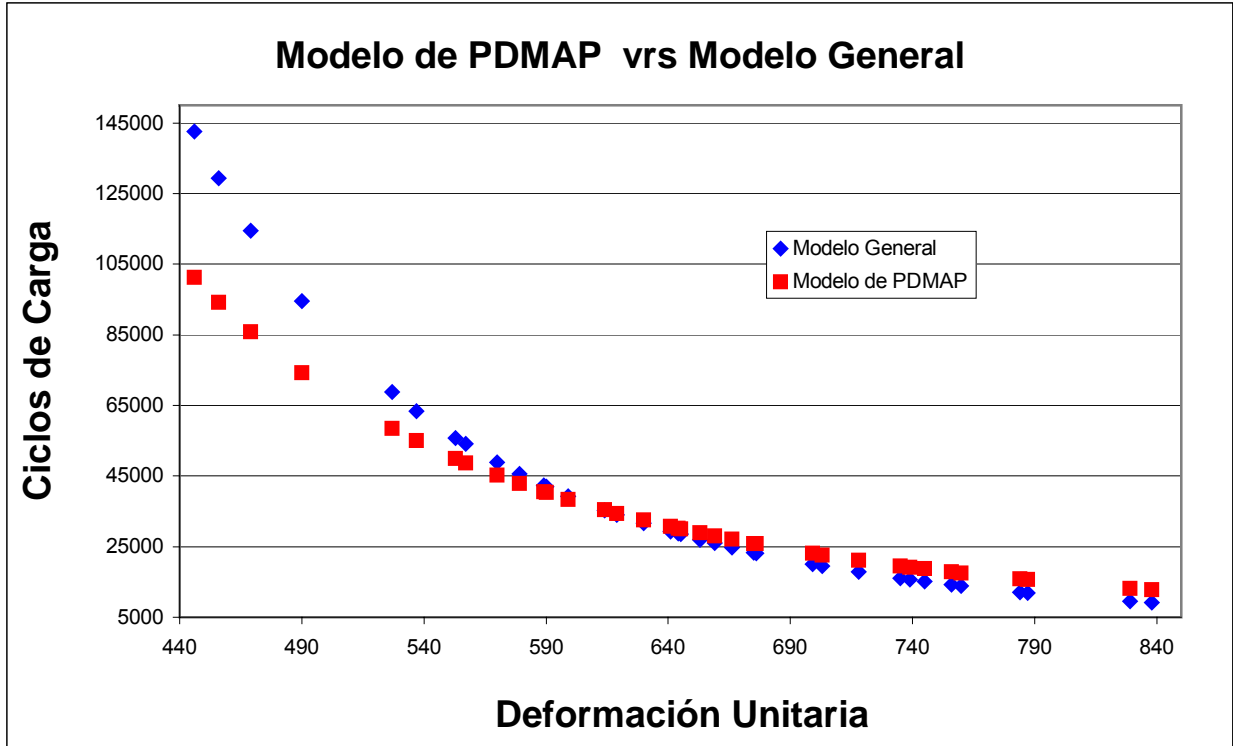


Figura 5.7. Modelo de PDMAP vrs Modelo General.

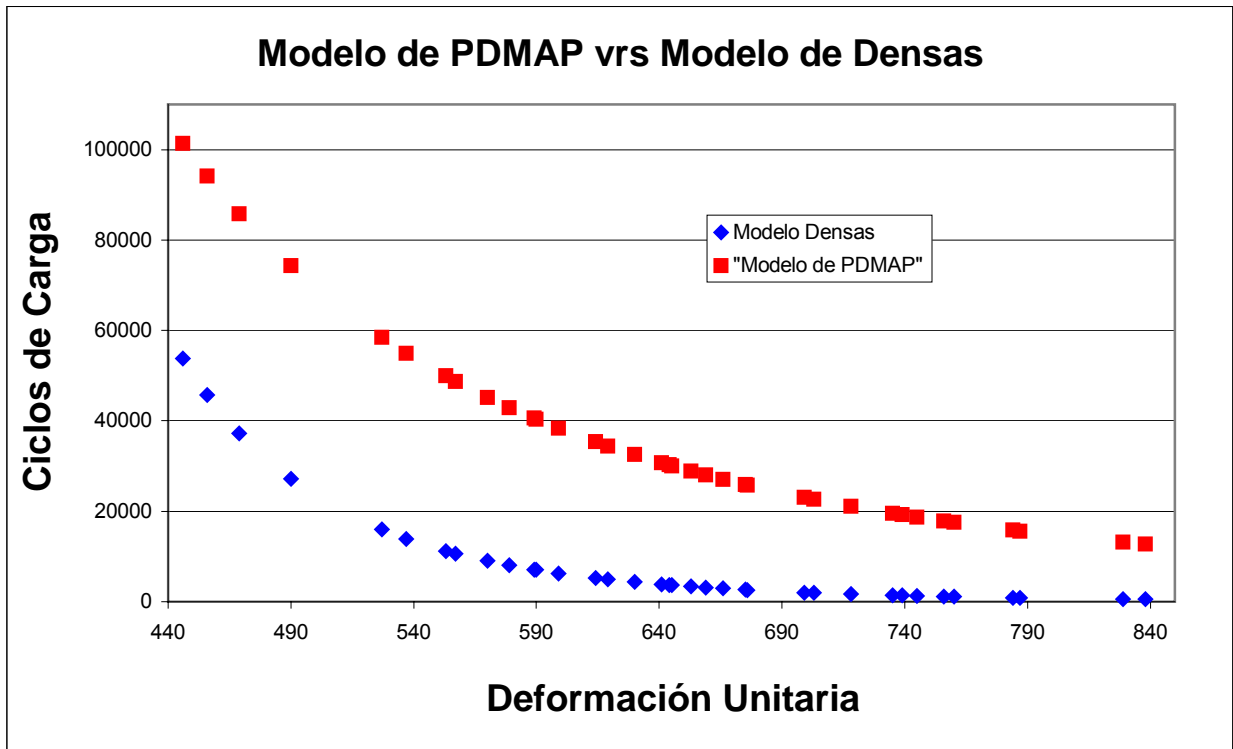


Figura 5.8. Modelo de PDMAP vrs Modelo de Densas.

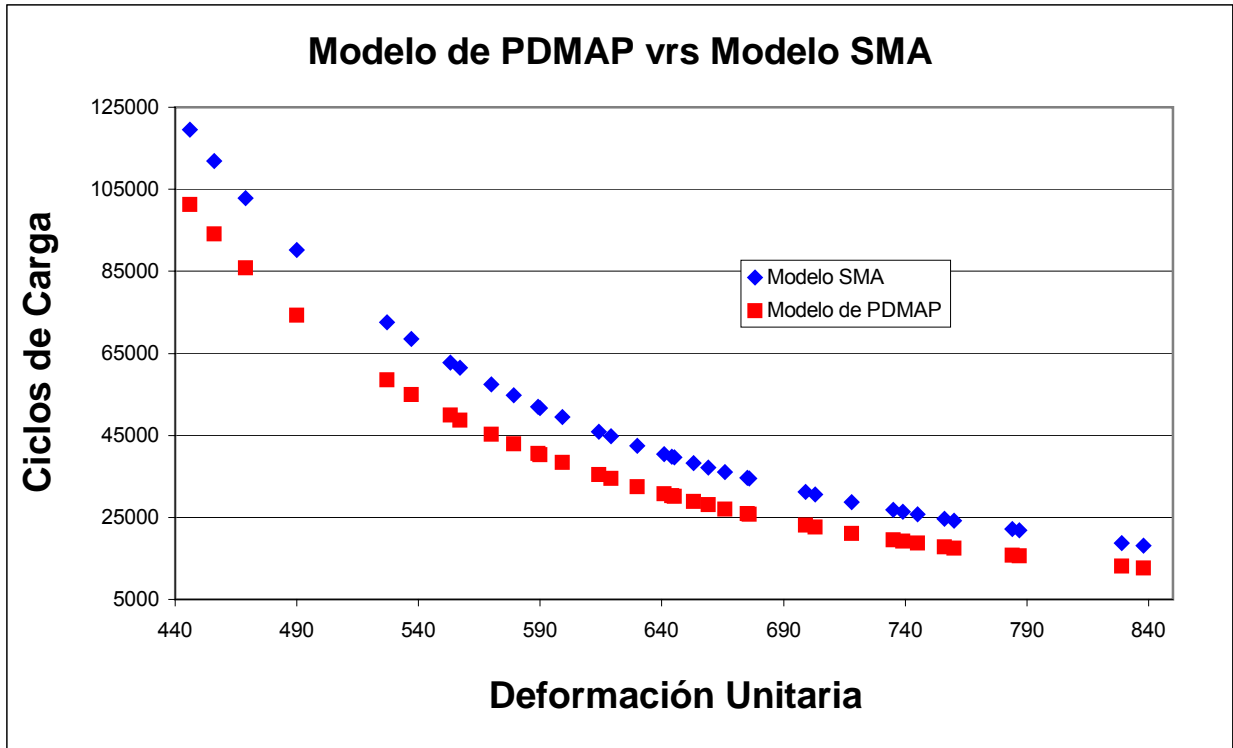


Figura 5.9. Modelo de PDMAP vrs Modelo de SMA.

Para la aplicación de los modelos de uso internacional se requiere de un valor de ajuste, por lo cual se graficaron las diferencias entre cada comparación de los modelos generados e internacionales y se generó una ecuación que estima el valor de ajuste correspondiente a una deformación unitaria dada para cada par de modelos, con el fin de poder ajustar cada modelo internacional; además este ajuste se puede realizar gráficamente utilizando las siguientes figuras (Figuras de 5.10 a 5.18).

Este ajuste permitirá utilizar los modelos de uso internacional, pero aplicando un factor que permite ajustarlos a las condiciones de materias primas utilizadas en nuestro país

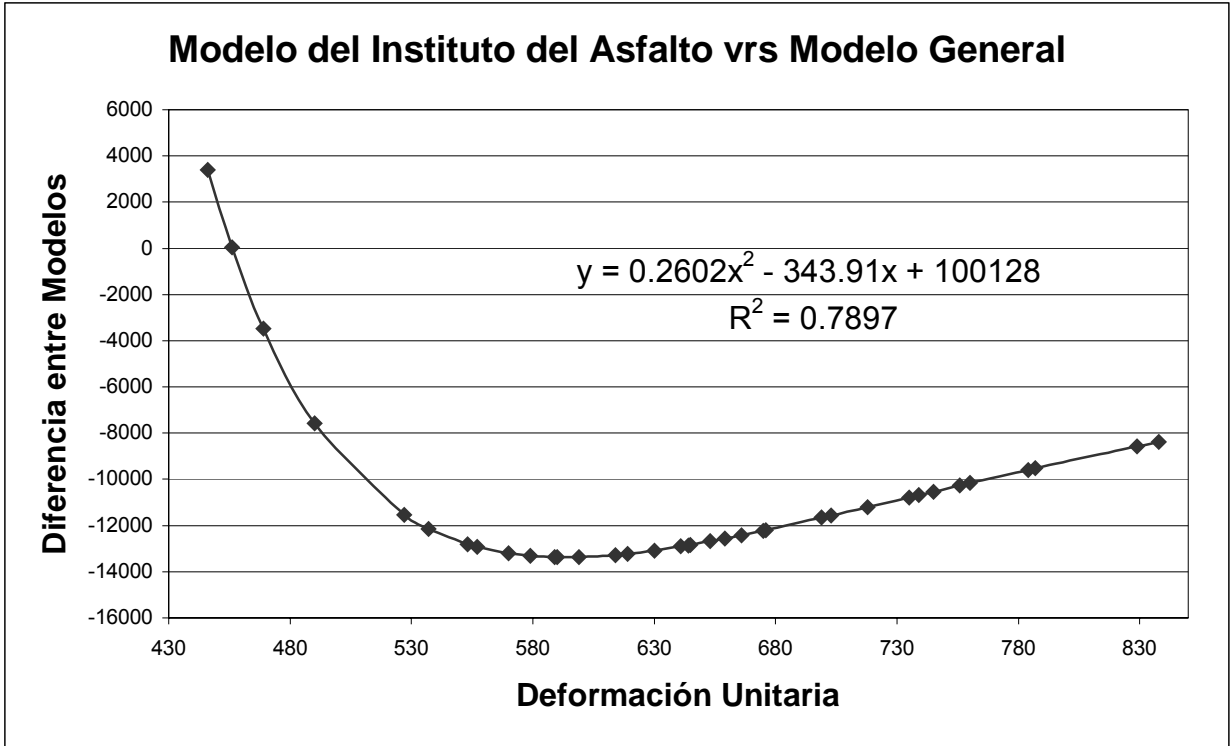


Figura 5.10. Grafico de ajuste entre Modelo del Inst. del Asfalto y el General.

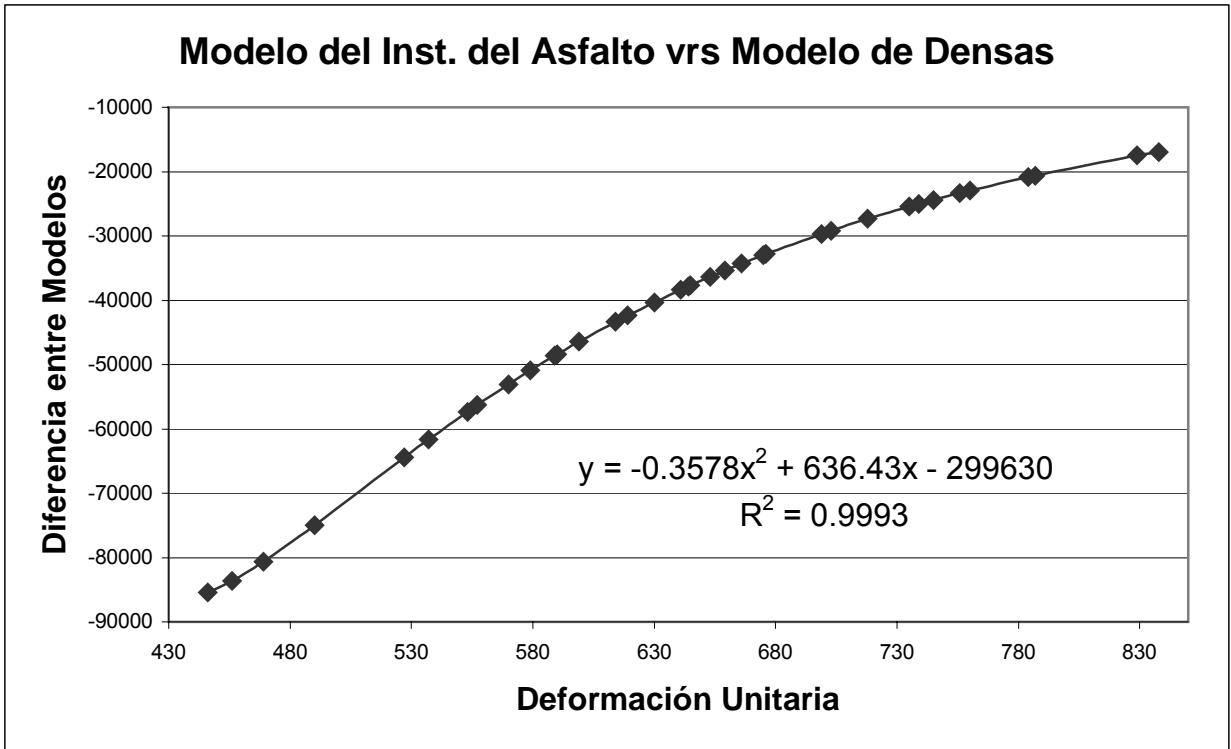


Figura 5.11. Grafico de ajuste entre Modelo del Inst. del Asfalto y el Densas.

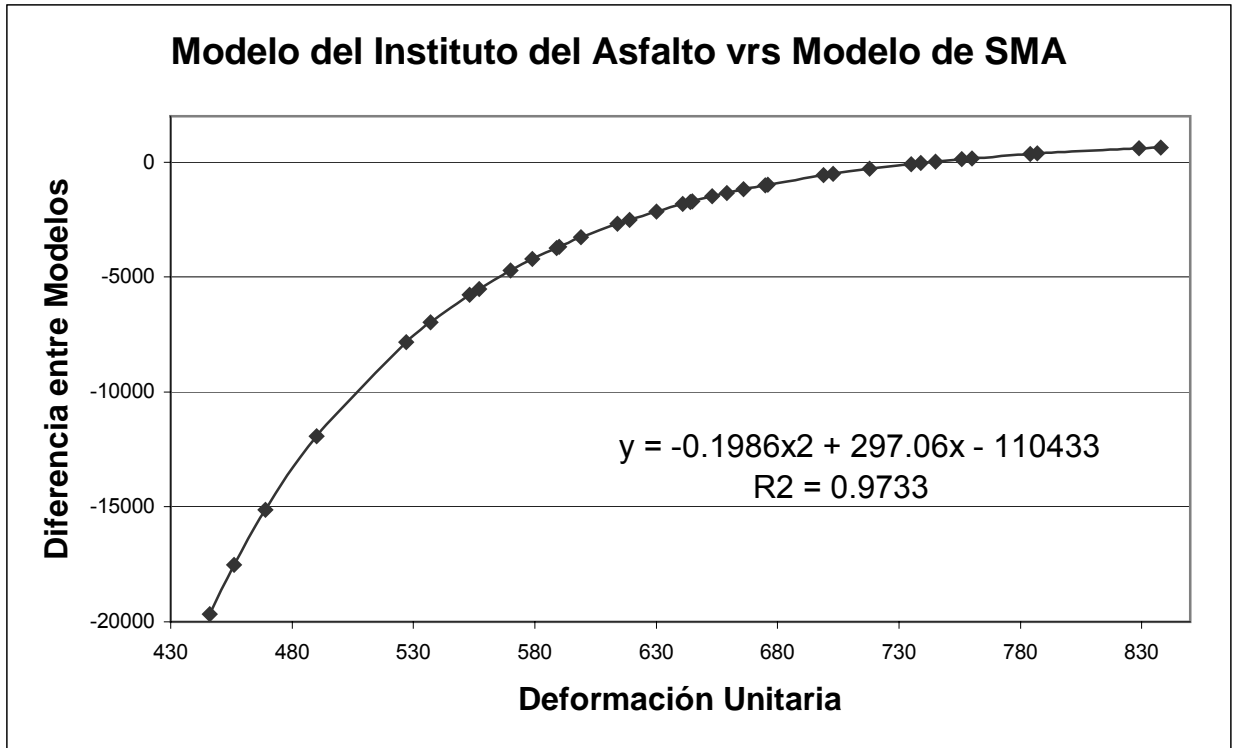


Figura 5.12. Grafico de ajuste entre Modelo del Inst. del Asfalto y el SMA.

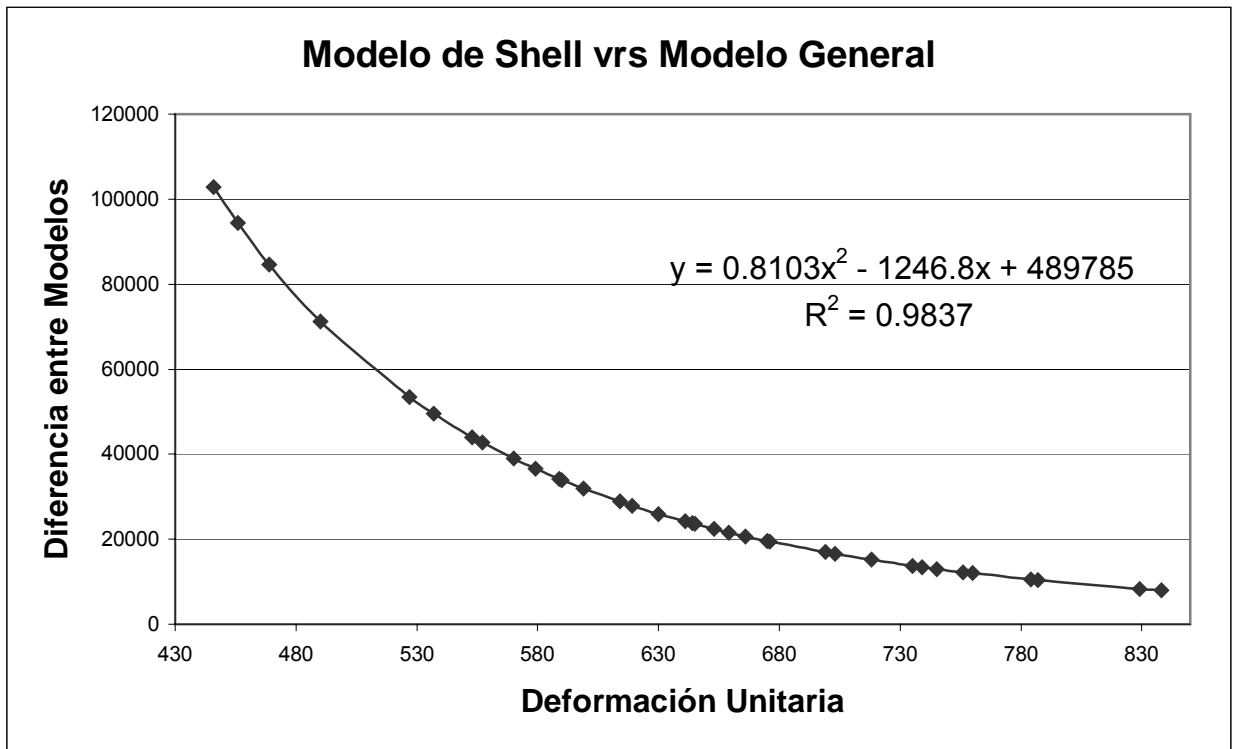


Figura 5.13. Grafico de ajuste entre Modelo de Shell y el Modelo de General.

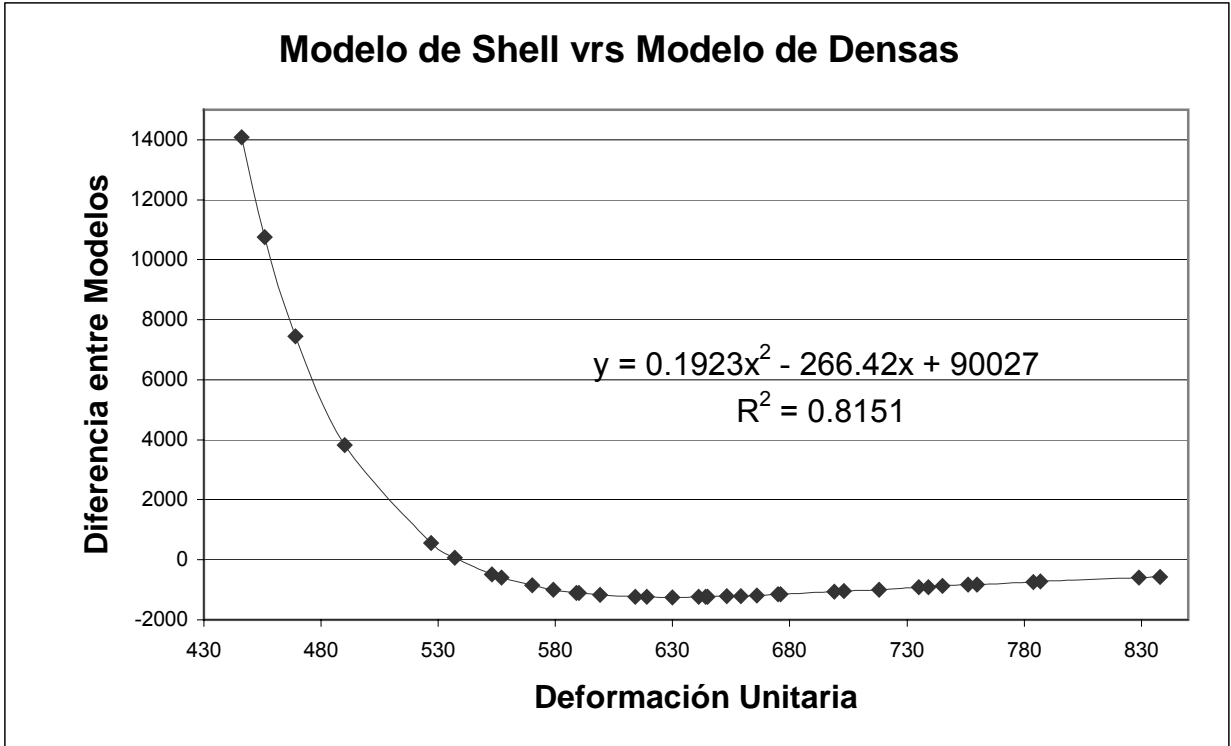


Figura 5.14. Grafico de ajuste entre Modelo de Shell y el Modelo de Densas.

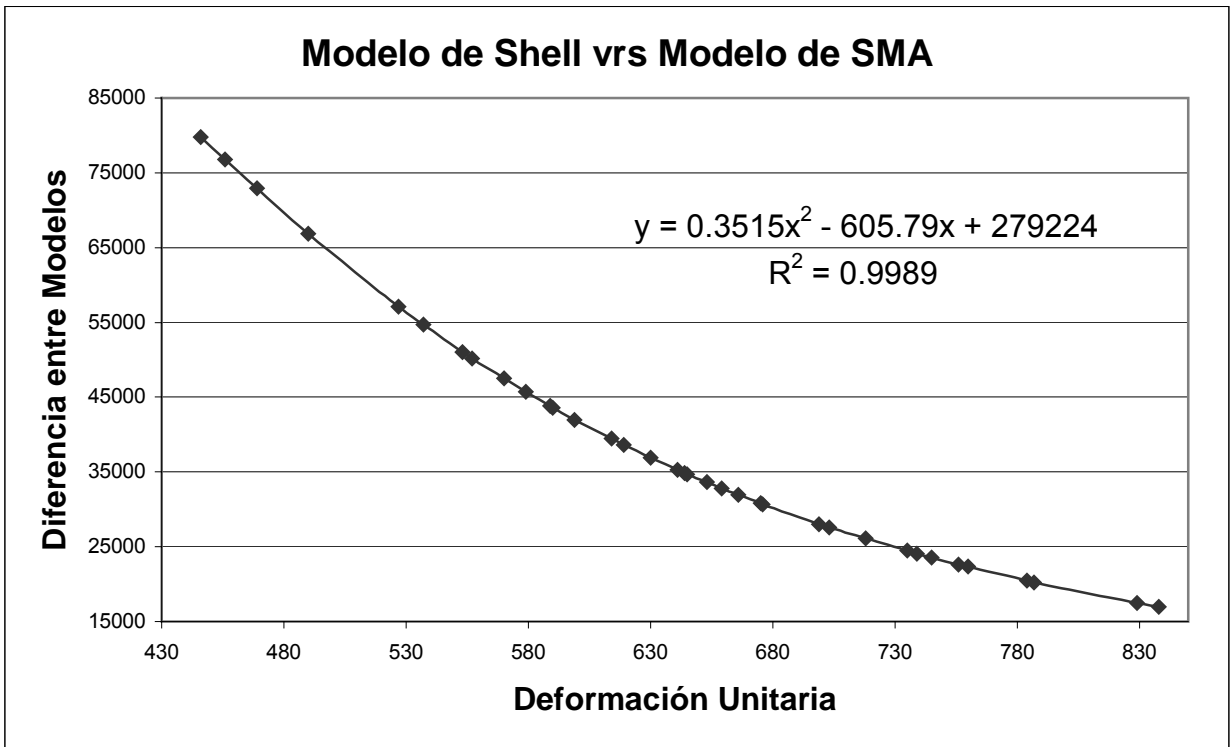


Figura 5.15. Grafico de ajuste entre Modelo de Shell y el Modelo de SMA.

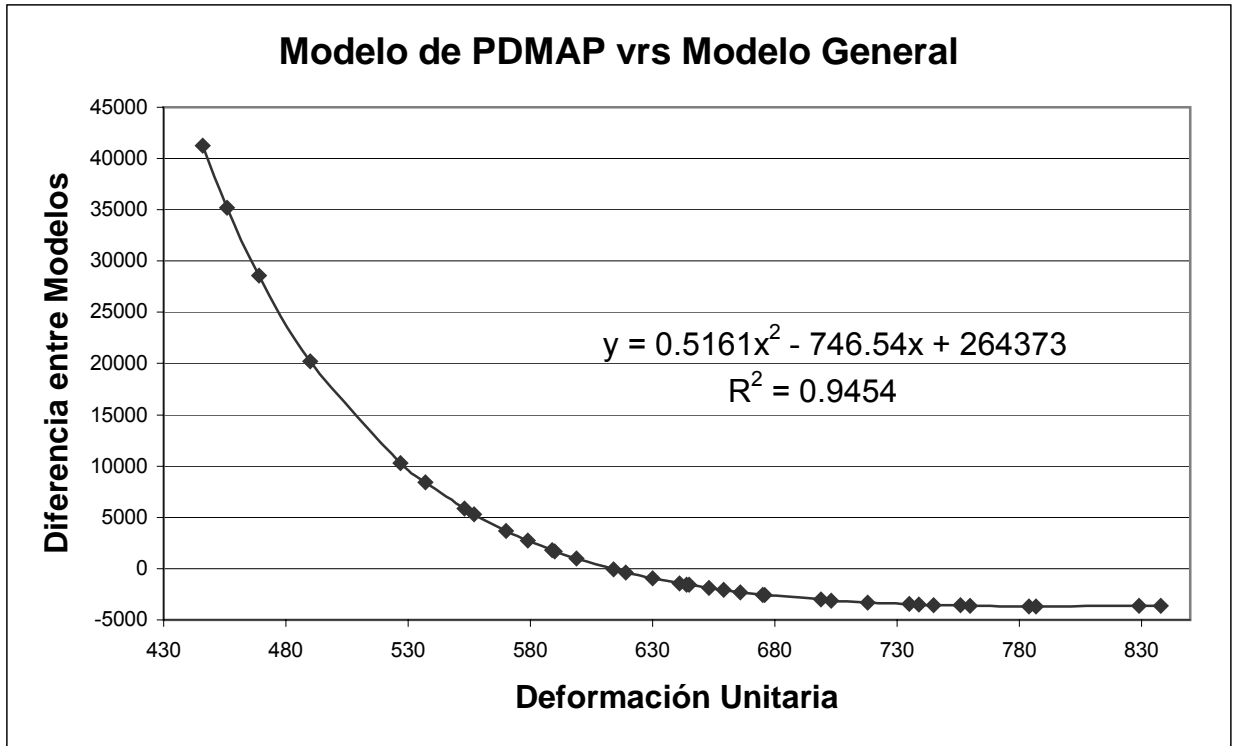


Figura 5.16. Grafico de ajuste entre Modelo de PDMAP y el Modelo de General.

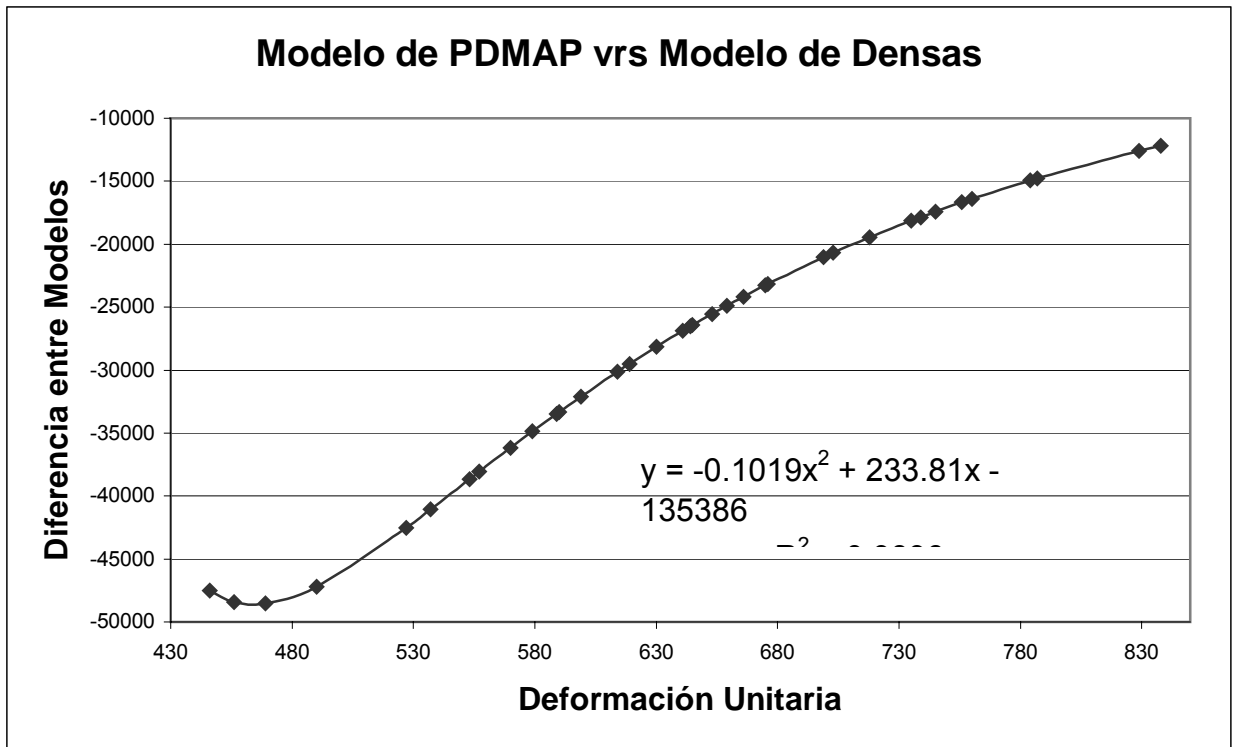


Figura 5.17. Grafico de ajuste entre Modelo de PDMAP y el Modelo de Densas.

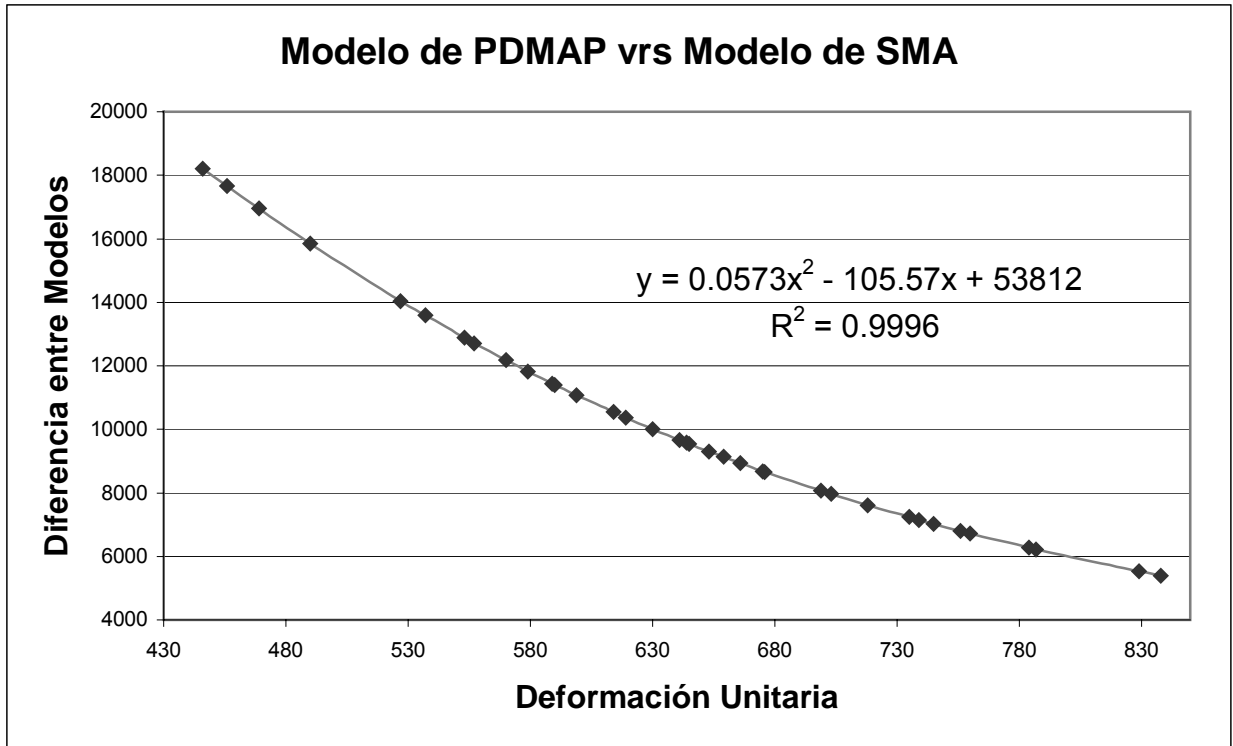


Figura 5.18. Grafico de ajuste entre Modelo de PDMAP y el Modelo de SMA.

En cada uno de los gráficos se muestra una ecuación de ajuste, con lo cual al evaluar en un modelo internacional, la estimación obtenida debe ser corregida con un valor obtenido en estas ecuaciones de ajuste mostradas en las Figuras 5.10 al 5.18 según corresponda; este valor puede ser negativo o positivo por lo que a la estimación de ciclos de carga obtenida del modelo internacional se deberá restar o sumar, respectivamente.

La diferencia entre los modelos internacionales y los generados disminuye al aumentar la magnitud de la deformación unitaria. En la Tabla 5.7 se muestran las ecuaciones de ajuste de cada modelo, en las cuales el valor “x” es el valor de la deformación unitaria y el valor de “y” es el número de ciclos de carga con el cual se debe corregir el modelo internacional.

Además en la Tabla 5.8 se muestra un factor de ajuste para cada combinación de modelos; así como, el coeficiente de correlación entre dichos modelos, para

diferentes rangos de deformación unitaria. Al estimar el número de ciclos para la falla por fatiga de una mezcla asfáltica mediante un modelo de uso internacional, este debe ser multiplicado por el factor de ajuste.

También en la Tabla 5.8 se muestran los coeficientes de correlación para cada comparación de modelos, y cada uno de estos valores es cercano a uno, lo cual indica una buena correlación entre cada uno de los modelos.

Tabla 5.7. Ecuaciones de ajuste.

Modelo Internacional vrs Modelo Generado	Ecuación de Ajuste	R ²
Instituto del Asfalto vrs General	$y = 0.2602x^2 - 343.91x + 100128$	0.7897
Instituto del Asfalto vrs Densas	$y = -0.3578x^2 + 636.43x - 299630$	0.9993
Instituto del Asfalto vrs SMA	$y = -0.1986x^2 + 297.06x - 110433$	0.9733
Shell vrs General	$y = 0.8103x^2 - 1246.8x + 489785$	0.9837
Shell vrs Densas	$y = 0.1923x^2 - 266.42x + 90027$	0.8151
Shell vrs SMA	$y = 0.3515x^2 - 605.79x + 279224$	0.9989
PDMAP vrs General	$y = 0.5161x^2 - 746.54x + 264373$	0.9454
PDMAP vrs Densas	$y = -0.1019x^2 + 233.81x - 135386$	0.9896
PDMAP vrs SMA	$y = 0.0573x^2 - 105.57x + 53812$	0.9996

Nota: "y=N_f" y "x=ε_t".

Tabla 5.8. Factores de Ajuste y coeficientes de correlación.

Modelo Internacional vrs Modelo Generado	Factor de Ajuste				Coeficiente de Correlación
	Rango de deformación E-6 mm/mm				
	450-550	550-650	650-750	750-850	
Instituto del Asfalto vrs General	1.074	1.348	1.577	1.809	0.996
Instituto del Asfalto vrs Densas	0.250	0.189	0.156	0.132	0.995
Instituto del Asfalto vrs SMA	0.782	0.981	1.148	1.317	0.996
Shell vrs General	3.800	8.711	15.550	25.831	0.961
Shell vrs Densas	0.854	1.198	1.515	1.861	0.995
Shell vrs SMA	2.766	6.341	11.319	18.803	0.961
PDMAP vrs General	1.135	1.065	1.019	0.981	1.000
PDMAP vrs Densas	0.268	0.151	0.101	0.072	0.979
PDMAP vrs SMA	0.826	0.775	0.742	0.714	1.000

CONCLUSIONES

El análisis estadístico realizado permitió definir cuales parámetros son significativos en el desempeño que tendrá una mezcla asfáltica en cuanto a su capacidad de resistencia a la fatiga (densas o discontinuas), dentro de estos parámetros se encontró que la fuente de agregado, tipo de mezcla, el rango de deformación unitaria y la interacción de estos son significativos para determinar la capacidad a fatiga del concreto asfáltico, no así, el porcentaje de vacíos en el agregado mineral. Por tipo de mezcla debe entenderse como las cuatro diferentes categorías que se definieron en el análisis estadístico (1. Densa con AC30 (DAC), 2. Densa con AC30+SBS (DAS), 3. SMA con AC30 (SAC) y 4. SMA con PG70 (SPG)) y no como tipo de granulometría (DGM y SMA).

Específicamente se determinó que las mezclas con asfalto AC30 modificado con SBS, específicamente mezclas densas, tuvieron un mejor desempeño que las mezclas que utilizaron AC30 y PG70, tanto en mezclas densas como en mezclas SMA, o sea una mayor capacidad a resistir la fatiga; esto debido en parte a que el asfalto modificado presenta menor susceptibilidad al envejecimiento que los otros dos asfalto utilizados característica relacionada con la capacidad a resistir fatiga; adicionalmente por el efecto de la modificación con SBS propiamente (diferencia cuantitativa sustancial respecto a ligantes no modificados).

Además se puede notar que no existe diferencia significativa entre las mezclas SMA con asfalto AC30 y SMA con asfalto PG70, así como no existe diferencia significativa entre estas mezclas y las mezclas densas con asfalto AC30.

Así, se demuestra que el tipo de granulometría ya sea densa o SMA no muestra incidencia en la capacidad a fatiga del concreto asfáltico.

En cuanto a la diferencia entre la fuente de agregado utilizada en los diferentes tratamientos experimentales, se encontró que no existe diferencia significativa con los

agregado provenientes de Guápiles y de Belén, pero si existe un mejor desempeño de las mezclas en las que se utilizó agregado de Las Cónavas.

Para las mezclas densas con asfalto AC30 no se encontró diferencia alguna entre las tres fuentes de agregados utilizados, en ninguna de los tres rangos de deformaciones unitarias a las que se realizaron los ensayos, a excepción de las deformaciones bajas en las cuales los agregados de Belén y Guápiles no presentaron diferencia alguna entre sí, pero en comparación con el agregado de Las Cónavas, este tuvo mejor desempeño. De igual manera se presentaron los resultados de las mezclas densas con AC30 modificado, en los cuales se presentó diferencia entre las fuentes de agregado sólo para deformaciones unitarias bajas ($400E-6$ mm/mm)

En el caso de las mezclas de matriz de agregado grueso SMA no se encontró diferencia significativa entre ninguna de las tres fuentes de agregado utilizadas en ninguno de los tres rangos de deformaciones unitarias evaluados (400, 500 y 600 E-6 mm/mm), tanto para las mezclas con AC30 como para las mezclas con PG70.

Por lo anterior se determina que dentro de los cuatro tipos de mezclas utilizadas, la mezcla que utilizó asfalto modificado obtuvo mejor capacidad de fatiga, pero sólo en el rango de deformaciones bajo.

Esto sugiere que el uso de asfaltos modificados con polímeros demandaría menores espesores de capa de ruedo menores, pero con la utilización de asfaltos modificados, para proyectos en los cuales la flota vehicular que transitará por dicho proyecto sean vehículos livianos los cuales implicaran en cargas y esfuerzos menores.

Por el contrario, para proyectos que se verán sometidos a esfuerzos grandes, o sea, deformaciones unitarias frecuentes en el rango de $600E-6$ mm/mm o mayores, se hace notar la necesidad de aplicar espesores de capa de ruedo lo suficientemente grandes como para disminuir los esfuerzos de tracción en la mezcla asfáltica, esto principalmente debido a que el análisis estadístico refleja que no hay diferencia

significativa en la utilización de una u otra fuente de agregado, así como tampoco la hay en el tipo de asfalto a utilizar ni en el tipo de mezcla (densa o SMA) para estos casos de deformación unitaria.

En cuanto a los modelos desarrollados en este estudio, el modelo que estima mayores capacidades a fatiga es el modelo generado con los datos de la mezclas SMA, mientras que el modelo más conservador es el generado por mezclas densas. Además el modelo general estima valores medios de capacidad de fatiga.

El modelo SMA y el modelo del Instituto del Asfalto son los que estiman mayores números de ciclos de carga y además estas estimaciones presentan similitud, no así con los otros modelos internacionales. Mientras que el modelo generado más conservador es el modelo para mezclas densas (DGM) y comportamiento que también presentan las estimaciones de capacidad de fatiga realizadas por el modelo internacional de la Shell. Por otro lado el modelo General presenta mayor similitud con el de PDMAP y ambos estiman valores intermedios.

Debido a la similitud de los tres modelos internacionales con los tres modelos generados no se sugiere una calibración de estos, pero si el uso del modelo de Shell y el modelo Densas para estimar la capacidad a resistir fatiga para capas de ruedo asfálticas en las cuales el tipo de granulometría a utilizar en la mezcla asfáltica sea una granulometría densa. De igual se sugiere el uso del modelo del Instituto del Asfalto y del modelo SMA, para proyectos en los cuales la granulometría de la mezcla asfáltica sea una granulometría discontinua (SMA). En el caso de no tener conocimiento de cual tipo de granulometría se utilizará en el proyecto, el modelo General o el modelo de PDMAP es el más recomendable, haciendo una revisión una vez definida la granulometría de la mezcla asfáltica.

Recomendaciones

En este proyecto al igual que en los otros trabajos que forman parte de esta misma línea de investigación se buscó perfilar una metodología aplicable en el país. Y debido a que estas investigaciones fueron realizadas en laboratorio es importante que se complementen con estudios en situ como por ejemplo tramos de prueba, que permitan definir con mayor claridad la durabilidad de las mezclas y el desempeño durante la vida útil del pavimento.

BIBLIOGRAFÍA

1. Cordero Jimenez, Luis. **Desarrollo de Modelos de Desempeño para Mezcla Asfáltica con Ligante Asfáltico de Consistencia Superior a la Convencional.** Informe de Trabajo de Graduación. San José: Universidad de Costa Rica, 2005.
2. Badilla Vargas, Gustavo. **Estudio Comparativo del Desempeño en Laboratorio Para Concretos Asfálticos de Granulometría Densa y Granulometría Discontinua.** Informe de Trabajo de Graduación. San José: Universidad de Costa Rica, 2005.
3. Sequeira Rojas, Wendy. **Efecto de las Propiedades de los Componentes de la Mezcla Asfáltica sobre la Resistencia al Deterioro por Efecto del Agua.** Informe de Trabajo de Graduación. San José: Universidad de Costa Rica, 2004.
4. Allen Monge, Jaime, **Efecto del uso de Agregado Ígneo sobre las Propiedades de Diseño para Concreto Asfáltico de Graduación Densa.** Informe de Trabajo de Graduación. San José: Universidad de Costa Rica, 2004.
5. Aguiar Moya, Jose Pablo. **Valoración de Resistencia al Daño por Humedad y a la Deformación Permanente en Mezclas Asfálticas con Matriz de Agregado Grueso de Origen Volcánico.** Informe de Trabajo de Graduación. San José: Universidad de Costa Rica, 2004.
6. Leiva Villacorta, Fabricio. **Caracterización Físico-Mecánica para Concreto Asfáltico con Matriz de Agregado Grueso de Origen Sedimentario.** Informe de Trabajo de Graduación. San José: Universidad de Costa Rica, 2003.

7. Carmona Arias, Elizabeth. **Modelación de Desempeño para Mezclas Asfálticas con Graduación Densa y Agregado Sedimentario.** Informe de Trabajo de Graduación. San José: Universidad de Costa Rica, 2003.
8. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). **Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing.** Tomos 1 y 3. Decimoctava edición. 1994.
9. American Society for Testing and Materials (ASTM). **Vol 4.02 Concrete and aggregates, 4.03 Road and Pavement Management Technologies.**
10. Instituto del Asfalto. **Manuales de SUPERPAVE.** Designaciones SP-1" y SP-2.
11. Castro Fernández, Pedro. **Notas de Clase del Curso de Pavimentos.** Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, 2004.
12. Castro Fernández, Pedro. **Manual de Laboratorio de Pavimentos.** Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, 2004.
13. Huang, Yuang. **Pavement Analysis and Design.** Prentice Hall, 1991.

ANEXOS

A.1. Anexo 1

Granulometrías utilizadas con correcciones de polvo adherido.

Tabla A.1. Granulometría Densa de Belén.

Tipo de Mezcla		DGM3					
Fuente de Agregado		Belén					
Malla	%Pas	%Ret Acum	%Ret	W ret (g)	%Polvo	W polvo (g)	W ret corregido (g)
3/4"	100	0	0	0	0.00	0.00	0.0
1/2"	95	5	5	187.5	0.38	0.71	188.2
3/8"	63	37	32	1200	0.10	1.20	1201.2
No. 4	50	50	13	487.5	0.16	0.78	488.3
No.8	50	50	0	0	0.22	0.00	0.0
No.16	40	60	10	375	0.16	0.60	375.6
No.30	31	69	9	337.5	0.26	0.88	338.4
No.50	26	74	5	187.5	1.38	2.59	190.1
No.100	19	81	7	262.5	5.96	15.65	278.1
No.200	6	94	13	487.5	14.19	69.18	556.7
Charola	0	100	6	225	0.00	0.00	133.4
PESO TOTAL (g)	3750				Total	91.58	3750.0

Tabla A.2. Granulometría SMA de Belén.

Tipo de Mezcla		SMA3					
Fuente de Agregado		Belén					
Malla	%Pas	%Ret Acum	%Ret	W ret (g)	%Polvo	W polvo (g)	W ret corregido (g)
3/4"	100	0	0	0	0.00	0.00	0.0
1/2"	92	8	8	300	0.38	1.14	301.1
3/8"	40	60	52	1950	0.10	1.95	1952.0
No. 4	26	74	14	525	0.16	0.84	525.8
No.8	21	79	5	187.5	0.22	0.41	187.9
No.16	20	80	1	37.5	0.16	0.06	37.6
No.30	19	81	1	37.5	0.26	0.10	37.6
No.50	18	82	1	37.5	1.38	0.52	38.0
No.100	16	84	2	75	5.96	4.47	79.5
No.200	15	85	1	37.5	14.19	5.32	42.8
Caliza	0	100	15	562.5	0.00	0.00	547.7
PESO TOTAL (g)	3750				Total	14.81	3750.0

Tabla A.3. Granulometría Densa de Guápiles.

Tipo de Mezcla		DGM3					
Fuente de Agregado		Guápiles-La Esmeralda-Conansa					
Malla	%Pas	%Ret Acum	%Ret	W ret (g)	%Polvo	W polvo (g)	W ret corregido (g)
3/4"	100	0	0	0	0.00	0.00	0.0
1/2"	95	5	5	187.5	0.02	0.04	187.5
3/8"	63	37	32	1200	0.84	10.04	1210.0
No. 4	50	50	13	487.5	0.08	0.41	487.9
No.8	50	50	0	0	0.70	0.00	0.0
No.16	40	60	10	375	0.70	2.64	377.6
No.30	31	69	9	337.5	0.15	0.51	338.0
No.50	26	74	5	187.5	1.75	3.29	190.8
No.100	19	81	7	262.5	4.68	12.28	274.8
No.200	6	94	13	487.5	8.95	43.61	531.1
Charola	0	100	6	225	0.00	0.00	152.2
PESO TOTAL (g)	3750				Total	72.82	3750.0

Tabla A.4. Granulometría SMA de Guápiles.

Tipo de Mezcla		SMA2					
Fuente de Agregado		Guápiles-La Esmeralda-Conansa					
Malla	%Pas	%Ret Acum	%Ret	W ret (g)	%Polvo	W polvo (g)	W ret corregido (g)
3/4"	100	0	0	0	0.00	0.00	0.0
1/2"	94	6	6	225	1.42	3.20	228.2
3/8"	45	55	49	1837.5	1.42	26.09	1863.6
No. 4	23	77	22	825	1.42	11.72	836.7
No.8	21	79	2	75	1.42	1.07	76.1
No.16	19	81	2	75	1.42	1.07	76.1
No.30	18	82	1	37.5	1.42	0.53	38.0
No.50	16	84	2	75	1.42	1.07	76.1
No.100	15	85	1	37.5	1.42	0.53	38.0
No.200	13	87	2	75	1.42	1.07	76.1
Caliza	0	100	13	487.5	0.00	0.00	441.2
PESO TOTAL (g)	3750				Total	46.33	3750.0

Tabla A.5. Granulometría Densa de Las Cóncavas.

Tipo de Mezcla		DGM2					
Fuente de Agregado		Las Cóncavas					
Malla	%Pas	%Ret Acum	%Ret	W ret (g)	%Polvo	W polvo (g)	W ret corregido (g)
3/4"	100	0	0	0	0.00	0.00	0.0
1/2"	95	5	5	187.5	1.00	1.88	189.4
3/8"	71	29	24	900	1.80	16.20	916.2
No. 4	48	52	23	862.5	2.80	24.15	886.7
No.8	30	70	18	675	3.20	21.60	696.6
No.16	26	74	4	150	5.10	7.65	157.7
No.30	22	78	4	150	11.60	17.40	167.4
No.50	10	90	12	450	14.50	65.25	515.3
No.100	7	93	3	112.5	17.30	19.46	132.0
No.200	6	94	1	37.5	19.30	7.24	44.7
Charola	0	100	6	225	0.00	0.00	44.2
PESO TOTAL (g)	3750				Total	180.83	3750.0

Tabla A.6. Granulometría SMA de Las Cóncavas.

Tipo de Mezcla		SMA3					
Fuente de Agregado		Las Cóncavas					
Malla	%Pas	%Ret Acum	%Ret	W ret (g)	%Polvo	W polvo (g)	W ret corregido (g)
3/4"	100	0	0	0	0.00	0.00	0.0
1/2"	92	8	8	300	1.00	3.00	303.0
3/8"	40	60	52	1950	1.80	35.10	1985.1
No. 4	26	74	14	525	2.80	14.70	539.7
No.8	24	76	2	75	3.20	2.40	77.4
No.16	23	77	1	37.5	5.10	1.91	39.4
No.30	23	77	0	0	11.60	0.00	0.0
No.50	20	80	3	112.5	14.50	16.31	128.8
No.100	17	83	3	112.5	17.30	19.46	132.0
No.200	12	88	5	187.5	19.30	36.19	223.7
Caliza	0	100	12	450	0.00	0.00	320.9
PESO TOTAL (g)	3750				Total	129.08	3750.0

A.2. Anexo 2

En el siguiente anexo se presentan la información de cada uno de los bloques mezclados seguida de la información de las vigas de cada bloque.

Tabla A.7. Bloque Belén-DGM-AC30+SBS-1.

Fecha de mezclado	03/05/2005	Granulometría	DGM3
Agregado	Belén	Temperatura de Mezclado	180-185 °C
Asfalto	AC30 SBS	Temperatura de Compactación	166-171 °C

	Unidad	1	2	3	4	5	6
Peso de agregado	g	3582.0	3584.2	3582.6	3583.0	3581.2	4470.0
Porcentaje de Asfalto	%	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
Peso asfalto calculado	g	204.2	204.3	204.2	204.2	204.1	254.8
Peso asfalto real	g	204.3	204.1	204.1	204.4	204.0	254.8
Temperatura de mezclado	□C	177.0	175.1	175.6	174.4	175.3	176.3
Temperatura de asfalto	□C	167.8	162.1	165.3	162.7	161.1	162.2
Hora	---	08:50	08:54	08:59	09:03	09:07	09:12

Peso seco (Kg)	23.440
Peso sumergido (Kg)	13.152
Peso saturado superficie seca (Kg)	23.460
G bs	2.274
G mm	2.455
%Vacíos	7.37

Inicio de Curado	03/05/2005
Fin de Curado	08/05/2005

Tabla A.8. Vigas Belén-DGM-AC30+SBS-1.

Fecha de mezclado	<u>03/05/2005</u>	Granulometría	<u>DGM3</u>
Agregado	<u>Belén</u>	Temperatura de Mezclado	<u>180-185 °C</u>
Asfalto	<u>AC30 SBS</u>	Temperatura de Compactación	<u>166-171 °C</u>

Viga	1	2	3	4
Peso seco (Kg)	2639.3	2622.9	2614.4	2623.4
Peso sumergido (Kg)	1475.3	1468.2	1469.5	1467.9
Peso saturado superficie seca (Kg)	2641.9	2626.5	2620.6	2628.5
G bs	2.262	2.264	2.271	2.260
G mm	2.455	2.455	2.455	2.455
%Vacíos	7.8	7.8	7.5	7.9
Deformación unitaria	600	400	600	500
Ciclos para falla	44830	22910	12280	41150
Rigidez	3074	2586	298	2394

Viga 1		Viga 2		Viga 3		Viga 4	
Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura
63.15	49.46	63.67	50.12	62.07	49.53	62.77	48.84
63.10	49.70	63.60	49.87	62.37	49.48	62.28	49.35
63.33	49.60	63.16	49.36	62.77	49.15	62.50	49.05
63.44	49.80	63.81	49.63	62.45	49.84	62.70	49.14
63.72	49.86	63.99	49.80	62.75	49.68	62.68	49.20
63.35	49.68	63.65	49.76	62.48	49.54	62.59	49.12

Tabla A.9. Bloque Belén-DGM-AC30+SBS-2.

Fecha de mezclado	<u>03/05/2005</u>	Granulometría	<u>DGM3</u>
Agregado	<u>Belén</u>	Temperatura de Mezclado	<u>180-185 °C</u>
Asfalto	<u>AC30 SBS</u>	Temperatura de Compactación	<u>166-171 °C</u>

	Unidad	1	2	3	4	5	6
Peso de agregado	g	3730.4	3731.3	3731.2	3731.2	3731.1	3733.4
Porcentaje de Asfalto	%	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
Peso asfalto calculado	g	212.6	212.7	212.7	212.7	212.7	212.8
Peso asfalto real	g	212.8	212.5	212.5	212.5	212.7	212.5
Temperatura de mezclado	□C	171.1	175.1	175.5	174.3	180.7	175.5
Temperatura de asfalto	□C	167.2	162.1	160.3	165.0	160.0	160.2
Hora	----	09:23	09:28	09:31	09:35	09:30	09:47

Peso seco (Kg)	23.430
Peso sumergido (Kg)	13.152
Peso saturado superficie seca (Kg)	23.450
G bs	2.275
G mm	2.455
%Vacíos	7.32

Inicio de Curado	03/05/2005
Fin de Curado	08/05/2005

Tabla A.10. Vigas Belén-DGM-AC30+SBS-2.

Fecha de mezclado	<u>03/05/2005</u>	Granulometría	<u>DGM3</u>
Agregado	<u>Belén</u>	Temperatura de Mezclado	<u>180-185 °C</u>
Asfalto	<u>AC30 SBS</u>	Temperatura de Compactación	<u>166-171 °C</u>

Viga	5	6	7	8
Peso seco (Kg)	2654.4	2636.2	2684.2	2562.1
Peso sumergido (Kg)	1483.2	1472.0	1499.6	1431.3
Peso saturado superficie seca (Kg)	2658.0	2639.0	2686.7	2565.9
G bs	2.259	2.259	2.261	2.258
G mm	2.455	2.455	2.455	2.455
%Vacíos	8.0	8.0	7.9	8.0
Deformación unitaria	500	600	400	400
Ciclos para falla	47990	17000	184430	250390
Rigidez	1835	2515	2290	2653

Viga 5		Viga 6		Viga 7		Viga 8	
Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura
64.10	50.27	63.17	49.53	63.96	50.13	62.29	49.33
63.99	50.16	62.78	49.49	63.80	50.21	62.24	49.21
64.09	49.75	63.03	49.28	63.18	50.31	62.17	48.70
63.58	49.43	62.76	49.33	63.41	50.23	62.45	49.58
63.70	49.24	62.66	49.50	63.82	50.14	62.48	48.93
63.89	49.77	62.88	49.43	63.63	50.20	62.33	49.15

Tabla A.11. Bloque Belén-DGM-AC30-1.

Fecha de mezclado	<u>02/02/2005</u>	Granulometría	<u>DGM3</u>
Agregado	<u>Belén</u>	Temperatura de Mezclado	<u>157-162 °C</u>
Asfalto	<u>AC 30</u>	Temperatura de Compactación	<u>147-152 °C</u>

	Unidad	1	2	3	4	5	6
Peso de agregado	g	4375.6	4374.3	4376.0	4376.1	4373.4	4376.0
Porcentaje de Asfalto	%	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9
Peso asfalto calculado	g	256.0	255.9	256.0	256.0	255.8	256.0
Peso asfalto real	g	257.2	255.8	258.5	255.3	256.0	256.6
Temperatura de mezclado	□C	157.2	157.7	157.1	158.3	161.7	156.8
Temperatura de asfalto	□C	160.7	161.8	159.5	164.3	163.6	161.4
Hora	----	09:28	09:32	09:41	09:46	09:53	10:00

Peso seco (Kg)	27.400
Peso sumergido (Kg)	15.446
Peso saturado superficie seca (Kg)	27.460
G bs	2.281
G mm	2.418
%Vacíos	5.7

Inicio de Curado	03/02/2005
Fin de Curado	08/02/2005

Tabla A.12. Vigas Belén-DGM-AC30-1.

Fecha de mezclado	<u>02/02/2005</u>	Granulometría	<u>DGM3</u>
Agregado	<u>Belén</u>	Temperatura de Mezclado	<u>157-162 °C</u>
Asfalto	<u>AC 30</u>	Temperatura de Compactación	<u>147-152 °C</u>

Viga	1	2	3	4
Peso seco (Kg)	2704.8	2737.4	2813.4	2831.4
Peso sumergido (Kg)	1525.1	1549.2	1597.2	1594.4
Peso saturado superficie seca (Kg)	2717.4	2742.0	2818.7	2838.8
G bs	2.269	2.295	2.303	2.275
G mm	2.418	2.418	2.418	2.418
%Vacíos	6.2	5.1	4.7	5.9
Deformación unitaria	500	400	400	500
Ciclos para falla	64490	78330	110940	2160
Rigidez	4123	5107	4632	2584

Viga 1		Viga 2		Viga 3		Viga 4	
Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura
62.86	50.38	62.67	50.52	63.03	51.74	64.24	51.02
62.85	50.28	62.43	50.43	63.14	51.64	64.23	51.08
62.95	50.60	62.56	50.50	63.32	51.54	64.44	51.40
63.17	50.64	63.08	50.37	63.64	50.65	64.87	52.72
63.24	51.02	62.75	50.40	63.67	50.65	64.65	53.02
63.01	50.58	62.70	50.44	63.36	51.24	64.49	51.85

Tabla A.13. Bloque Belén-DGM-AC30-2.

Fecha de mezclado	02/03/2005	Granulometría	DGM3
Agregado	Belén	Temperatura de Mezclado	157-162 °C
Asfalto	AC30	Temperatura de Compactación	147-152 °C

	Unidad	1	2	3	4	5
Peso de agregado	g	4479.6	4478.5	4479.4	4476.9	4476.7
Porcentaje de Asfalto	%	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9
Peso asfalto calculado	g	262.1	262.0	262.0	262.0	261.9
Peso asfalto real	g	262.2	262.0	262.1	261.9	261.8
Temperatura de mezclado	□C	156.9	157.4	156.8	158.0	161.4
Temperatura de asfalto	□C	160.3	161.4	159.1	163.9	163.2
Hora	----	10:03	10:08	10:14	10:21	10:29

Peso seco (Kg)	22.600
Peso sumergido (Kg)	12.485
Peso saturado superficie seca (Kg)	22.640
G bs	2.226
G mm	2.418
%Vacíos	7.96

Inicio de Curado	02/03/2005
Fin de Curado	07/03/2005

Tabla A.14. Vigas Belén-DGM-AC30-2.

Fecha de mezclado	02/03/2005	Granulometría	DGM3
Agregado	Belén	Temperatura de Mezclado	157-162 °C
Asfalto	AC30	Temperatura de Compactación	147-152 °C

Viga	5	6	7	8
Peso seco (Kg)	2546.8	2600.6	2539.8	2537.9
Peso sumergido (Kg)	1439.8	1459.6	1433.4	1429.5
Peso saturado superficie seca (Kg)	2566.7	2622.0	2567.1	2569.3
G bs	2.260	2.237	2.240	2.227
G mm	2.418	2.418	2.418	2.418
%Vacíos	6.5	7.5	7.4	7.9
Deformación unitaria	500	400	600	600
Ciclos para falla	45670	293580	8370	43520
Rigidez	2477	2965	2194	2202

Viga 5		Viga 6		Viga 7		Viga 8	
Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura
63.08	48.40	63.14	50.10	62.81	49.31	62.56	49.56
63.25	49.00	63.24	50.16	62.57	49.65	62.68	49.29
63.26	48.15	63.19	49.95	62.77	49.12	62.64	49.58
62.78	48.62	62.98	50.14	62.86	48.86	62.53	49.69
63.17	48.14	62.91	50.00	62.78	49.28	62.47	49.67
63.11	48.46	63.09	50.07	62.76	49.24	62.58	49.56

Tabla A.15. Bloque Belén-SMA-AC30-1.

Fecha de mezclado	02/03/2005	Granulometría	SMA3
Agregado	Belén	Temperatura de Mezclado	157-162 °C
Asfalto	AC30	Temperatura de Compactación	147-152 °C

	Unidad	1	2	3	4	5
Peso de agregado	g	4495.2	4497.3	4494.9	4497.3	4496.4
Porcentaje de Asfalto	%	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7
Peso asfalto calculado	g	293.6	293.8	293.6	293.8	293.7
Peso asfalto real	g	293.4	293.7	293.7	293.7	293.6
Temperatura de mezclado	□C	156.8	158.0	157.3	158.2	160.2
Temperatura de asfalto	□C	160.3	160.4	159.9	160.5	163.2
Hora	----	08:55	09:05	09:15	09:22	09:29

Peso seco (Kg)	23.160
Peso sumergido (Kg)	13.117
Peso saturado superficie seca (Kg)	23.320
G bs	2.270
G mm	2.419
%Vacíos	6.16

Inicio de Curado	02/03/2005
Fin de Curado	07/03/2005

Tabla A.16. Vigas Belén-SMA-AC30-1.

Fecha de mezclado	02/03/2005	Granulometría	SMA3
Agregado	Belén	Temperatura de Mezclado	157-162 °C
Asfalto	AC30	Temperatura de Compactación	147-152 °C

Viga	1	2	3	4
Peso seco (Kg)	2609.0	2626.8	2635.6	2592.3
Peso sumergido (Kg)	1553.1	1546.0	1558.0	1516.6
Peso saturado superficie seca (Kg)	2700.4	2704.2	2721.1	2666.2
G bs	2.274	2.268	2.266	2.255
G mm	2.419	2.419	2.419	2.419
%Vacíos	6.0	6.2	6.3	6.8
Deformación unitaria	500	500	600	600
Ciclos para falla	80130	172100	78360	39520
Rigidez	3888	3522	3123	2513

Viga 1		Viga 2		Viga 3		Viga 4	
Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura
64.01	50.18	64.07	50.16	63.46	50.94	63.46	50.77
63.86	50.04	64.08	50.32	63.52	51.02	63.81	50.85
63.95	49.48	63.97	50.74	63.66	50.89	63.60	50.99
63.31	49.19	63.75	50.52	63.06	50.41	63.20	50.24
63.25	49.25	63.71	50.54	63.21	50.36	63.18	50.73
63.68	49.63	63.92	50.46	63.38	50.72	63.45	50.72

Tabla A.17. Bloque Belén-SMA-AC30-2.

Fecha de mezclado	20/04/2005	Granulometría	SMA3
Agregado	Belén	Temperatura de Mezclado	157-162 °C
Asfalto	AC30	Temperatura de Compactación	147-152 °C

	Unidad	1	2	3	4	5	6
Peso de agregado	g	3752.4	3750.1	3750.3	3752.8	3754.8	3748.4
Porcentaje de Asfalto	%	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7
Peso asfalto calculado	g	245.0	244.8	244.9	245.0	245.2	247.7
Peso asfalto real	g	245.2	244.6	244.7	245.2	245.1	247.3
Temperatura de mezclado	□C	152.0	150.0	152.1	152.0	149.0	151.0
Temperatura de asfalto	□C	155.0	146.9	156.0	150.1	150.6	152.1
Hora	---	10:50	10:55	11:05	11:09	11:17	11:22

Peso seco (Kg)	23.480
Peso sumergido (Kg)	12.981
Peso saturado superficie seca (Kg)	23.520
G bs	2.228
G mm	2.419
%Vacíos	7.90

Inicio de Curado	20/04/2005
Fin de Curado	25/04/2005

Tabla A.18. Vigas Belén-SMA-AC30-2.

Fecha de mezclado	20/04/2005	Granulometría	SMA3
Agregado	Belén	Temperatura de Mezclado	157-162 °C
Asfalto	AC30	Temperatura de Compactación	147-152 °C

Viga	5	6	7	8
Peso seco (Kg)	2334.5	2314.4	2225.2	2253.0
Peso sumergido (Kg)	1313.6	1302.8	1261.4	1277.3
Peso saturado superficie seca (Kg)	2359.4	2340.6	2253.7	2278.6
G bs	2.232	2.230	2.242	2.250
G mm	2.419	2.419	2.419	2.419
%Vacíos	7.7	7.8	7.3	7.0
Deformación unitaria	400	400	500	
Ciclos para falla	125300	277080	166550	----
Rigidez	2808	2438	1993	----

Viga 5		Viga 6		Viga 7		Viga 8	
Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura
64.12	50.06	63.15	49.78	63.90	49.27	63.30	50.17
64.06	49.02	63.64	49.38	63.38	49.14	63.16	50.15
64.22	48.05	64.30	49.79	63.51	48.86	64.00	49.63
64.22	50.33	63.46	49.78	63.38	49.21	63.37	50.01
64.22	49.18	64.11	49.88	63.36	49.04	63.35	50.01
64.17	49.33	63.73	49.72	63.51	49.10	63.44	49.99

Tabla A.19. Bloque Belén-SMA-PG70-1.

Fecha de mezclado	16/03/2005	Granulometría	SMA3
Agregado	Belén	Temperatura de Mezclado	163-169 °C
Asfalto	PG70	Temperatura de Compactación	153-157 °C

	Unidad	1	2	3	4	5	6
Peso de agregado	g	4479.2	3588.2	3587.2	3586.5	3587.1	3586.3
Porcentaje de Asfalto	%	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2
Peso asfalto calculado	g	271.8	217.8	217.7	217.7	217.7	217.6
Peso asfalto real	g	272.0	217.5	217.5	217.9	217.9	217.8
Temperatura de mezclado	□C	226.6	161.9	160.1	162.9	163.5	163.3
Temperatura de asfalto	□C	163.8	164.1	161.4	154.5	161.5	161.4
Hora	----	09:16	09:25	09:32	09:41	09:49	09:57

Peso seco (Kg)	22.670
Peso sumergido (Kg)	12.612
Peso saturado superficie seca (Kg)	22.710
G bs	2.245
G mm	2.419
%Vacíos	7.19

Inicio de Curado	16/03/2005
Fin de Curado	21/03/2005

Tabla A.20. Vigas Belén-SMA-PG70-1.

Fecha de mezclado	16/03/2005	Granulometría	SMA3
Agregado	Belén	Temperatura de Mezclado	163-169 °C
Asfalto	PG70	Temperatura de Compactación	153-157 °C

Viga	1	2	3	4
Peso seco (Kg)	2304.2	2256.0	2220.6	2245
Peso sumergido (Kg)	1313.6	1297.0	1289.8	1280.3
Peso saturado superficie seca (Kg)	2336.8	2287.9	2254.0	2279.3
G bs	2.252	2.277	2.303	2.247
G mm	2.419	2.419	2.419	2.419
%Vacíos	6.9	5.9	4.8	7.1
Deformación unitaria	600	---	---	400
Ciclos para falla	15790	---	---	167030
Rigidez	2332	---	---	2549

Viga 1		Viga 2		Viga 3		Viga 4	
Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura
63.86	50.34	63.56	49.17	62.77	50.02	63.38	49.60
64.04	51.15	63.67	49.99	62.95	49.50	63.58	49.98
63.45	50.35	63.75	48.31	62.94	49.49	63.56	49.88
63.77	50.03	63.30	49.34	63.10	49.87	63.39	50.31
63.71	49.62	63.09	49.50	63.26	49.28	63.04	50.88
63.77	50.30	63.47	49.26	63.00	49.63	63.39	50.13

Tabla A.21. Bloque Belén-SMA-PG70-2.

Fecha de mezclado	16/03/2005	Granulometría	SMA3
Agregado	Belén	Temperatura de Mezclado	163-169 °C
Asfalto	PG70	Temperatura de Compactación	153-157 °C

	Unidad	1	2	3	4	5	6
Peso de agregado	g	3735.0	3735.4	3734.9	3736.8	3733.5	3733.0
Porcentaje de Asfalto	%	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2
Peso asfalto calculado	g	226.7	226.7	226.7	226.8	226.6	226.6
Peso asfalto real	g	226.2	227.0	226.7	226.8	227.0	226.6
Temperatura de mezclado	□C	160.1	157.6	162.4	163.5	162.2	162.7
Temperatura de asfalto	□C	163.6	160.1	165.7	167.5	165.7	165.2
Hora	----	10:13	10:18	10:22	10:32	10:37	10:44

Peso seco (Kg)	22.670
Peso sumergido (Kg)	12.544
Peso saturado superficie seca (Kg)	22.710
G bs	2.230
G mm	2.419
%Vacíos	7.81

Inicio de Curado	16/03/2005
Fin de Curado	21/03/2005

Tabla A.22. Vigas Belén-SMA-PG70-2.

Fecha de mezclado	16/03/2005	Granulometría	SMA3
Agregado	Belén	Temperatura de Mezclado	163-169 °C
Asfalto	PG70	Temperatura de Compactación	153-157 °C

Viga	5	6	7	8
Peso seco (Kg)	2261.5	2392.2	2388.3	2302.1
Peso sumergido (Kg)	1280.3	1353.7	1347	1307.4
Peso saturado superficie seca (Kg)	2290.7	2418.9	2416.3	2330.8
G bs	2.238	2.246	2.234	2.249
G mm	2.419	2.419	2.419	2.419
%Vacíos	7.5	7.2	7.7	7.0
Deformación unitaria	500	400	500	600
Ciclos para falla	39120	270040	35640	13350
Rigidez	2613	2811	2920	2711

Viga 5		Viga 6		Viga 7		Viga 8	
Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura
62.19	50.35	64.14	50.73	63.52	50.44	62.97	50.36
62.17	49.54	64.02	50.42	63.60	50.33	62.96	49.60
62.25	50.51	63.88	51.00	63.53	50.81	63.01	49.99
62.51	48.86	63.79	50.22	63.70	50.00	63.01	49.44
62.62	48.72	63.76	50.71	63.44	50.71	62.96	49.83
62.35	49.60	63.92	50.62	63.56	50.46	62.98	49.84

Tabla A.23. Bloque Guápiles-DGM-AC30+SBS-1.

Fecha de mezclado	14/05/2005	Granulometría	DGM3
Agregado	Guápiles	Temperatura de Mezclado	180-185 °C
Asfalto	AC30+SBS	Temperatura de Compactación	166-171 °C

	Unidad	1	2	3	4	5	6
Peso de agregado	g	3726.2	3726.7	3727.1	3725.8	3725.4	3725.7
Porcentaje de Asfalto	%	5.93	5.93	5.93	5.93	5.93	5.93
Peso asfalto calculado	g	221.0	221.0	221.0	221.0	221.0	221.0
Peso asfalto real	g	221.0	221.3	221.4	221.5	220.8	220.9
Temperatura de mezclado	□C	175.5	177.0	177.4	178.2	176.7	174.0
Temperatura de asfalto	□C	166.0	174.4	173.5	176.1	170.7	171.5
Hora	----	08:11	08:15	08:18	08:21	08:24	08:27

Peso seco (Kg)	23.580
Peso sumergido (Kg)	13.300
Peso saturado superficie seca (Kg)	23.600
G bs	2.289
G mm	2.483
%Vacíos	7.80

Inicio de Curado	14/05/2005
Fin de Curado	19/05/2005

Tabla A.24. Vigas Guápiles-DGM-AC30+SBS-1.

Fecha de mezclado	<u>14/05/2005</u>	Granulometría	<u>DGM3</u>
Agregado	<u>Guápiles</u>	Temperatura de Mezclado	<u>180-185 °C</u>
Asfalto	<u>AC30+SBS</u>	Temperatura de Compactación	<u>166-171 °C</u>

Viga	1	2	3	4
Peso seco (Kg)	2510.5	2550.3	2522.7	2507.2
Peso sumergido (Kg)	1418.2	1439.9	1430.9	1418.6
Peso saturado superficie seca (Kg)	2513.0	2553.8	2532.3	2511.0
G bs	2.293	2.290	2.290	2.295
G mm	2.483	2.483	2.483	2.483
%Vacíos	7.6	7.8	7.8	7.6
Deformación unitaria	600	400	600	500
Ciclos para falla	50910	244470	12820	75580
Rigidez	2830	2785	1937	1241

Viga 1		Viga 2		Viga 3		Viga 4	
Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura
48.02	61.15	49.14	60.96	48.53	61.70	47.50	62.10
48.30	60.95	49.00	61.01	48.54	60.94	48.30	61.64
48.76	60.80	48.40	61.51	48.00	60.65	48.38	61.30
48.00	61.33	48.73	61.20	48.78	61.58	48.00	61.39
48.57	61.10	49.08	61.55	48.79	60.80	47.58	61.61
48.33	61.07	48.87	61.25	48.53	61.13	47.95	61.61

Tabla A.25. Bloque Guápiles-DGM-AC30+SBS-2.

Fecha de mezclado	<u>14/05/2005</u>	Granulometría	<u>DGM3</u>
Agregado	<u>Guápiles</u>	Temperatura de Mezclado	<u>180-185 °C</u>
Asfalto	<u>AC30+SBS</u>	Temperatura de Compactación	<u>166-171 °C</u>

	Unidad	1	2	3	4	5	6
Peso de agregado	g	3719.5	3725.9	3726	3723.3	3725.7	3726.8
Porcentaje de Asfalto	%	5.93	5.93	5.93	5.93	5.93	5.93
Peso asfalto calculado	g	221.0	221.0	221.0	221.0	221.0	221.0
Peso asfalto real	g	220.6	221.1	220.8	221.3	221.1	221.0
Temperatura de mezclado	□C	177.1	177.7	179.0	172.8	175.1	177.6
Temperatura de asfalto	□C	172.5	176.9	173.9	174.7	170.8	170.0
Hora	----	08:38	08:41	08:45	08:48	08:52	08:55

Peso seco (Kg)	23.560
Peso sumergido (Kg)	13.300
Peso saturado superficie seca (Kg)	23.600
G bs	2.287
G mm	2.483
%Vacíos	7.88

Inicio de Curado	14/05/2005
Fin de Curado	19/05/2005

Tabla A.26. Vigas Guápiles-DGM-AC30+SBS-2.

Fecha de mezclado	<u>14/05/2005</u>	Granulometría	<u>DGM3</u>
Agregado	<u>Guápiles</u>	Temperatura de Mezclado	<u>180-185 °C</u>
Asfalto	<u>AC30+SBS</u>	Temperatura de Compactación	<u>166-171 °C</u>

Viga	5	6	7	8
Peso seco (Kg)	2542.3	2527.6	2484.6	2580.1
Peso sumergido (Kg)	1435.3	1424.2	1404.9	1472.3
Peso saturado superficie seca (Kg)	2546.2	2530.3	2488.8	2583.7
G bs	2.289	2.285	2.292	2.321
G mm	2.483	2.483	2.483	2.483
%Vacíos	7.8	8.0	7.7	6.5
Deformación unitaria	400	500	500	600
Ciclos para falla	110770	28420	44980	10990
Rigidez	2830	2785	1937	1241

Viga 5		Viga 6		Viga 7		Viga 8	
Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura
48.29	62.30	48.20	61.52	47.34	61.95	49.83	61.45
48.54	61.40	48.52	61.43	47.66	61.47	49.84	61.15
48.42	61.21	48.66	61.61	48.00	61.20	49.93	61.55
48.42	61.53	48.95	61.63	47.55	61.55	49.57	61.10
48.43	62.00	48.82	61.83	48.01	61.74	49.51	61.20
48.42	61.69	48.63	61.60	47.71	61.58	49.74	61.29

Tabla A.27. Bloque Guápiles-DGM-AC30-1.

Fecha de mezclado	<u>25/05/2005</u>	Granulometría	<u>DGM3</u>
Agregado	<u>Guápiles</u>	Temperatura de Mezclado	<u>157-162 °C</u>
Asfalto	<u>AC30</u>	Temperatura de Compactación	<u>147.152 °C</u>

	Unidad	1	2	3	4	5	6
Peso de agregado	g	3726.5	3726.7	3726.1	3728.2	3669.6	3725.4
Porcentaje de Asfalto	%	5.71	5.71	5.71	5.71	5.71	5.71
Peso asfalto calculado	g	212.8	212.8	212.8	212.9	209.5	212.7
Peso asfalto real	g	212.9	212.8	212.8	212.9	209.2	212.4
Temperatura de mezclado	□C	155.9	155.0	154.3	154.8	154.4	155.3
Temperatura de asfalto	□C	153.4	150.9	153.6	149.7	152.3	151.9
Hora	----	08:10	08:14	08:17	08:22	08:27	08:32

Peso seco (Kg)	23.470
Peso sumergido (Kg)	13.400
Peso saturado superficie seca (Kg)	23.510
G bs	2.321
G mm	2.474
%Vacíos	6.17

Inicio de Curado	25/05/2005
Fin de Curado	30/05/2005

Tabla A.28. Vigas Guápiles-DGM-AC30-1.

Fecha de mezclado	<u>25/05/2005</u>	Granulometría	<u>DGM3</u>
Agregado	<u>Guápiles</u>	Temperatura de Mezclado	<u>157-162 °C</u>
Asfalto	<u>AC30</u>	Temperatura de Compactación	<u>147.152 °C</u>

Viga	1	2	3	4
Peso seco (Kg)	2660.8	2632.7	2578.3	2580.3
Peso sumergido (Kg)	1507.1	1484.7	1451.8	1452.3
Peso saturado superficie seca (Kg)	2665.3	2637.2	2582.7	2585.7
G bs	2.297	2.284	2.280	2.277
G mm	2.474	2.474	2.474	2.474
%Vacíos	7.1	7.7	7.8	8.0
Deformación unitaria	600	600	500	500
Ciclos para falla	11740	11430	35900	64320
Rigidez	2074	1913	2067	2443

Viga 1		Viga 2		Viga 3		Viga 4	
Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura
63.08	50.10	62.51	49.85	62.33	49.23	61.03	50.04
62.97	49.80	62.75	49.63	62.23	49.20	60.93	49.82
92.79	49.80	62.90	49.64	62.38	49.00	61.05	49.61
62.96	49.15	62.87	49.70	62.57	49.27	61.47	49.47
63.00	49.47	62.97	49.35	62.52	49.08	61.24	50.07
68.96	49.66	62.80	49.63	62.41	49.16	61.14	49.80

Tabla A.29. Bloque Guápiles-DGM-AC30-2.

Fecha de mezclado	<u>25/05/2005</u>	Granulometría	<u>DGM3</u>
Agregado	<u>Guápiles</u>	Temperatura de Mezclado	<u>157-162 °C</u>
Asfalto	<u>AC30</u>	Temperatura de Compactación	<u>147.152 °C</u>

	Unidad	1	2	3	4	5	6
Peso de agregado	g	3727.9	3725.2	3726.6	3735.2	3725.3	3726.0
Porcentaje de Asfalto	%	5.71	5.71	5.71	5.71	5.71	5.71
Peso asfalto calculado	g	212.86	212.7	212.78	213.27	212.71	212.75
Peso asfalto real	g	212.7	212.5	212.3	213.3	212.8	212.6
Temperatura de mezclado	□C	156.7	157.4	156.9	158.4	159.1	160.1
Temperatura de asfalto	□C	150.4	149.9	150.4	149.7	150.6	151
Hora	----	08:35	08:41	08:44	08:48	08:51	08:55

Peso seco (Kg)	23.540
Peso sumergido (Kg)	13.300
Peso saturado superficie seca (Kg)	23.560
G bs	2.294
G mm	2.474
%Vacíos	7.26

Inicio de Curado	25/05/2005
Fin de Curado	30/05/2005

Tabla A.30. Vigas Guápiles-DGM-AC30-2.

Fecha de mezclado	<u>25/05/2005</u>	Granulometría	<u>DGM3</u>
Agregado	<u>Guápiles</u>	Temperatura de Mezclado	<u>157-162 °C</u>
Asfalto	<u>AC30</u>	Temperatura de Compactación	<u>147.152 °C</u>

Viga	5	6	7	8
Peso seco (Kg)	2615.7	2642.9	2679.0	2707.8
Peso sumergido (Kg)	1468.9	1490.5	1513	1532.4
Peso saturado superficie seca (Kg)	2617.9	2645.2	2681.3	2710.1
G bs	2.277	2.289	2.293	2.299
G mm	2.474	2.474	2.474	2.474
%Vacíos	8.0	7.5	7.3	7.1
Deformación unitaria	400	400	500	400
Ciclos para falla	136360	132880	66680	220840
Rígidez	2882	2426	2175	2413

Viga 5		Viga 6		Viga 7		Viga 8	
Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura
62.58	49.38	61.74	49.88	62.61	50.13	62.81	50.38
62.29	49.35	61.96	49.97	62.86	50.08	62.65	50.48
62.29	49.40	61.95	49.95	63.00	50.02	62.24	50.36
62.58	49.87	61.97	49.87	63.08	49.98	62.38	50.51
62.40	48.84	62.15	49.81	63.25	49.92	62.82	50.40
62.43	49.37	61.95	49.90	62.96	50.03	62.58	50.43

Tabla A.31. Bloque Guápiles-SMA-AC30-1.

Fecha de mezclado	<u>08/06/2005</u>	Granulometría	<u>SMA2</u>
Agregado	<u>Guápiles</u>	Temperatura de Mezclado	<u>157-162 °C</u>
Asfalto	<u>AC30</u>	Temperatura de Compactación	<u>147.152 °C</u>

	Unidad	1	2	3	4	5	6
Peso de agregado	g	3746.8	3749.2	3729.4	3746.2	3748.6	3749.6
Porcentaje de Asfalto	%	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38
Peso asfalto calculado	g	233.8	233.9	232.7	233.8	233.9	234.0
Peso asfalto real	g	234.0	234.0	232.6	233.6	233.8	233.9
Temperatura de mezclado	□C	166.7	164.2	156.6	156.6	156.9	155.7
Temperatura de asfalto	□C	140.7	140.7	144	141.5	144.2	140
Hora	----	08:20	08:25	08:28	08:33	08:38	08:43

Peso seco (Kg)	23.770
Peso sumergido (Kg)	13.550
Peso saturado superficie seca (Kg)	24.040
G bs	2.266
G mm	2.444
%Vacíos	7.28

Inicio de Curado	08/08/2005
Fin de Curado	13/06/2005

Tabla A.32. Vigas Guápiles-SMA-AC30-1.

Fecha de mezclado	08/06/2005	Granulometría	SMA2
Agregado	Guápiles	Temperatura de Mezclado	157-162 °C
Asfalto	AC30	Temperatura de Compactación	147.152 °C

Viga	1	2	3	4
Peso seco (Kg)	2275.3	2279.6	2336.1	2252.9
Peso sumergido (Kg)	1291.0	1294.5	1345.5	1273.7
Peso saturado superficie seca (Kg)	2301.0	2305.3	2364.3	2274.6
G bs	2.253	2.255	2.293	2.251
G mm	2.444	2.444	2.444	2.444
%Vacíos	7.8	7.7	6.2	7.9
Deformación unitaria	600	600	500	400
Ciclos para falla	38330	69290	84510	177480
Rigidez	1335	1778	1756	1671

Viga 1		Viga 2		Viga 3		Viga 4	
Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura
61.40	49.40	63.03	49.57	63.50	49.25	64.27	49.30
61.45	49.25	62.69	50.06	63.73	50.41	63.62	49.52
61.80	49.10	62.08	49.85	63.23	50.03	62.86	49.77
61.39	48.74	63.07	49.21	63.70	49.00	63.88	48.93
61.64	48.10	63.11	49.77	64.05	50.63	63.10	49.01
61.54	48.92	62.80	49.69	63.64	49.86	63.55	49.31

Tabla A.33. Bloque Guápiles-SMA-AC30-2.

Fecha de mezclado	<u>08/06/2005</u>	Granulometría	<u>SMA2</u>
Agregado	<u>Guápiles</u>	Temperatura de Mezclado	<u>157-162 °C</u>
Asfalto	<u>AC30</u>	Temperatura de Compactación	<u>147.152 °C</u>

	Unidad	1	2	3	4	5	6
Peso de agregado	g	3746.4	3749.1	3750.8	3748.0	3749.5	3747.4
Porcentaje de Asfalto	%	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38
Peso asfalto calculado	g	233.8	233.4	234.1	233.9	234.0	233.8
Peso asfalto real	g	234.0	234.0	234.0	235.0	234.0	233.8
Temperatura de mezclado	□C	157.2	156.0	156.5	155.4	158.8	156.0
Temperatura de asfalto	□C	144.7	143.7	144.0	138.2	144.3	144.6
Hora	----	08:50	08:54	08:59	09:03	09:09	09:12

Peso seco (Kg)	23.790
Peso sumergido (Kg)	13.480
Peso saturado superficie seca (Kg)	23.950
G bs	2.272
G mm	2.444
%Vacíos	7.03

Inicio de Curado	08/06/2005
Fin de Curado	13/06/2005

Tabla A.34. Vigas Guápiles-SMA-AC30-2.

Fecha de mezclado	<u>08/06/2005</u>	Granulometría	<u>SMA2</u>
Agregado	<u>Guápiles</u>	Temperatura de Mezclado	<u>157-162 °C</u>
Asfalto	<u>AC30</u>	Temperatura de Compactación	<u>147.152 °C</u>

Viga	5	6	7	8
Peso seco (Kg)	2373.0	2359.2	2356.4	2415.0
Peso sumergido (Kg)	1340.1	1332.0	1335.6	1366.2
Peso saturado superficie seca (Kg)	2393.3	2380.1	2372.4	2441.7
G bs	2.253	2.251	2.273	2.245
G mm	2.444	2.444	2.444	2.444
%Vacíos	7.8	7.9	7.0	8.1
Deformación unitaria	500	600	400	----
Ciclos para falla	84600	42100	294670	----
Rigidez	1973	1845	2430	----

Viga 5		Viga 6		Viga 7		Viga 8	
Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura
64.23	49.67	63.09	48.55	63.65	48.11	64.08	50.48
63.22	50.32	62.73	49.80	63.13	48.46	63.14	50.83
63.19	50.17	62.10	48.90	62.80	48.93	63.16	51.24
63.56	49.57	62.84	50.50	62.45	48.69	63.41	50.74
64.05	50.83	62.45	49.83	62.60	49.22	63.40	51.73
63.65	50.11	62.64	49.52	62.93	48.68	63.44	51.00

Tabla A.35. Bloque Guápiles-SMA-PG70-1.

Fecha de mezclado	<u>29/06/2008</u>	Granulometría	<u>SMA2</u>
Agregado	<u>Guápiles</u>	Temperatura de Mezclado	<u>163-169 °C</u>
Asfalto	<u>PG70</u>	Temperatura de Compactación	<u>153-157 °C</u>

	Unidad	1	2	3	4	5	6
Peso de agregado	g	3747.5	3747.1	3752.4	3746.4	3710.2	3745.5
Porcentaje de Asfalto	%	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
Peso asfalto calculado	g	238.3	238.3	238.7	238.3	235.9	238.2
Peso asfalto real	g	238.3	238.2	238.4	238.2	235.7	238.3
Temperatura de mezclado	□C	168.9	163.4	166.9	163.9	163.6	163.3
Temperatura de asfalto	□C	166.1	164.8	162.1	161.6	160.0	161.0
Hora	----	08:18	08:22	08:26	08:29	08:35	08:38

Peso seco (Kg)	23.770
Peso sumergido (Kg)	13.600
Peso saturado superficie seca (Kg)	23.960
G bs	2.294
G mm	2.450
%Vacíos	6.35

Inicio de Curado	29/06/2005
Fin de Curado	04/07/2005

Tabla A.36. Vigas Guápiles-SMA-PG70-1.

Fecha de mezclado	<u>29/06/2008</u>	Granulometría	<u>SMA2</u>
Agregado	<u>Guápiles</u>	Temperatura de Mezclado	<u>163-169 °C</u>
Asfalto	<u>PG70</u>	Temperatura de Compactación	<u>153-157 °C</u>

Viga	1	2	3	4
Peso seco (Kg)	2378.6	2409.6	2395.2	2407.5
Peso sumergido (Kg)	1358.9	1376.7	1368.5	1375.5
Peso saturado superficie seca (Kg)	2399.2	2430.5	2410.7	2432.6
G bs	2.286	2.287	2.298	2.277
G mm	2.450	2.450	2.450	2.450
%Vacíos	6.7	6.7	6.2	7.0
Deformación unitaria	500	500	400	400
Ciclos para falla	----	287680	156990	162130
Rigidez	2055	1868	2042	1814

Viga 1		Viga 2		Viga 3		Viga 4	
Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura
63.45	49.30	63.49	49.14	63.08	50.60	62.90	49.92
62.98	50.15	63.27	49.08	62.96	50.98	63.04	49.76
63.35	50.13	63.63	48.10	63.51	50.80	63.22	50.20
62.91	50.06	63.47	49.82	63.87	50.82	63.33	49.66
63.12	49.86	63.31	49.39	63.17	50.72	63.39	49.59
63.16	49.90	63.43	49.11	63.32	50.78	63.18	49.83

Tabla A.37. Bloque Guápiles-SMA-PG70-2.

Fecha de mezclado	<u>29/06/2008</u>	Granulometría	<u>SMA2</u>
Agregado	<u>Guápiles</u>	Temperatura de Mezclado	<u>163-169 °C</u>
Asfalto	<u>PG70</u>	Temperatura de Compactación	<u>153-157 °C</u>

	Unidad	1	2	3	4	5	6
Peso de agregado	g	3746.10	3747.10	3745.80	3744.80	3746.70	3745.00
Porcentaje de Asfalto	%	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
Peso asfalto calculado	g	238.2	238.3	238.2	238.2	238.3	238.2
Peso asfalto real	g	238.3	238.1	238.0	238.1	238.2	238.2
Temperatura de mezclado	□C	163.1	162.4	163.9	162.7	161.9	162.5
Temperatura de asfalto	□C	161.6	160.4	162.5	158.8	158.5	160.9
Hora	----	08:48	08:52	08:57	09:01	09:04	09:09

Peso seco (Kg)	23.800
Peso sumergido (Kg)	13.600
Peso saturado superficie seca (Kg)	24.100
G bs	2.267
G mm	2.450
%Vacíos	7.48

Inicio de Curado	29/06/2005
Fin de Curado	04/07/2005

Tabla A.38. Vigas Guápiles-SMA-PG70-2.

Fecha de mezclado	<u>29/06/2008</u>	Granulometría	<u>SMA2</u>
Agregado	<u>Guápiles</u>	Temperatura de Mezclado	<u>163-169 °C</u>
Asfalto	<u>PG70</u>	Temperatura de Compactación	<u>153-157 °C</u>

Viga	5	6	7	8
Peso seco (Kg)	2409.6	2347.5	2429.6	2414.5
Peso sumergido (Kg)	1353.7	1347.4	1379.5	1379.5
Peso saturado superficie seca (Kg)	2421.7	2372.9	2456.4	2446.5
G bs	2.256	2.289	2.256	2.263
G mm	2.450	2.450	2.450	2.450
%Vacíos	7.9	6.6	7.9	7.6
Deformación unitaria	600	600	500	400
Ciclos para falla	49800	48970	133470	373400
Rigidez	2088	2318	2548	2605

Viga 5		Viga 6		Viga 7		Viga 8	
Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura
62.12	50.47	63.35	50.76	62.82	50.24	62.81	50.38
62.37	50.00	62.65	51.15	63.39	50.45	62.80	50.99
61.84	49.42	62.08	51.41	62.06	49.87	62.20	51.18
62.39	50.12	63.17	50.69	63.28	49.56	62.85	50.31
62.28	49.28	62.63	50.34	62.51	49.77	62.37	51.46
62.20	49.86	62.78	50.87	62.81	49.98	62.61	50.86

Tabla A.39. Bloque Las Cóncavas-DGM-AC30+SBS-1.

Fecha de mezclado	<u>29/07/2005</u>	Granulometría	<u>DGM2</u>
Agregado	<u>Cóncavas</u>	Temperatura de Mezclado	<u>180-185 °C</u>
Asfalto	<u>AC30+SBS</u>	Temperatura de Compactación	<u>166-171 °C</u>

	Unidad	1	2	3	4	5	6
Peso de agregado	g	3680.3	3682.9	3679.4	3681.1	3682.4	3688.7
Porcentaje de Asfalto	%	7.99	7.99	7.99	7.99	7.99	7.99
Peso asfalto calculado	g	294.0	294.2	293.9	294.1	294.2	294.7
Peso asfalto real	g	294.2	294.2	293.3	294.1	294.5	294.5
Temperatura de mezclado	□C	178.7	178.3	179.6	179.7	179.6	178.5
Temperatura de asfalto	□C	181.0	180.4	178.4	178.0	178.0	180.1
Hora	----	10:12	10:15	10:18	10:20	10:23	10:25

Peso seco (Kg)	23.800
Peso sumergido (Kg)	13.300
Peso saturado superficie seca (Kg)	23.850
G bs	2.256
G mm	2.416
%Vacíos	6.63

Inicio de Curado	29/07/2005
Fin de Curado	03/08/2005

Tabla A.40. Vigas Las Cóncavas-DGM-AC30+SBS-1.

Fecha de mezclado	29/07/2005	Granulometría	DGM2
Agregado	Cóncavas	Temperatura de Mezclado	180-185 °C
Asfalto	AC30+SBS	Temperatura de Compactación	166-171 °C

Viga	1	2	3	4
Peso seco (Kg)	2510.5	2502.9	2559.9	2548.3
Peso sumergido (Kg)	1409.3	1440.3	1428.4	1419.6
Peso saturado superficie seca (Kg)	2518.7	2543.3	2571.1	2557.3
G bs	2.263	2.269	2.240	2.240
G mm	2.416	2.416	2.416	2.416
%Vacíos	6.3	6.1	7.3	7.3
Deformación unitaria	600	500	600	500
Ciclos para falla	172030	357190	43970	214690
Rigidez	1728	1890	1862	2234

Viga 1		Viga 2		Viga 3		Viga 4	
Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura
62.08	51.28	64.45	49.23	61.82	50.76	62.37	49.12
63.06	51.58	64.63	48.90	62.58	49.97	62.57	49.48
63.60	50.31	64.86	48.76	62.92	50.64	62.42	50.23
62.60	52.00	64.79	49.99	62.38	50.74	62.53	49.79
62.40	51.58	64.54	49.55	63.03	50.30	62.54	50.43
62.75	51.35	64.65	49.29	62.55	50.48	62.49	49.81

Tabla A.41. Bloque Las Cóncavas-DGM-AC30+SBS-2.

Fecha de mezclado	<u>29/07/2005</u>	Granulometría	<u>DGM2</u>
Agregado	<u>Cóncavas</u>	Temperatura de Mezclado	<u>180-185 °C</u>
Asfalto	<u>AC30+SBS</u>	Temperatura de Compactación	<u>166-171 °C</u>

	Unidad	1	2	3	4	5	6
Peso de agregado	g	3658.9	3681.4	3680.1	3679.4	3684.0	3683.5
Porcentaje de Asfalto	%	7.99	7.99	7.99	7.99	7.99	7.99
Peso asfalto calculado	g	292.3	294.1	294.0	294.0	294.4	294.3
Peso asfalto real	g	292.3	294.3	294.5	293.4	294.5	294.3
Temperatura de mezclado	□C	176.3	177.3	176.8	177.6	176.7	177.0
Temperatura de asfalto	□C	181.2	181.3	180.3	181.5	181.3	180.4
Hora	----	10:29	10:31	10:33	10:35	10:38	10:40

Peso seco (Kg)	23.800
Peso sumergido (Kg)	13.300
Peso saturado superficie seca (Kg)	23.890
G bs	2.247
G mm	2.416
%Vacíos	6.98

Inicio de Curado	29/07/2005
Fin de Curado	03/08/2005

Tabla A.42. Vigas Las Cóncavas-DGM-AC30+SBS-2.

Fecha de mezclado	<u>29/07/2005</u>	Granulometría	<u>DGM2</u>
Agregado	<u>Cóncavas</u>	Temperatura de Mezclado	<u>180-185 °C</u>
Asfalto	<u>AC30+SBS</u>	Temperatura de Compactación	<u>166-171 °C</u>

Viga	5	6	7	8
Peso seco (Kg)	2647.3	2546.3	2521.0	2536.6
Peso sumergido (Kg)	1470.3	1421.6	1394.8	1407.7
Peso saturado superficie seca (Kg)	2654.5	2550.7	2528.9	2546.7
G bs	2.236	2.255	2.223	2.227
G mm	2.416	2.416	2.416	2.416
%Vacíos	7.5	6.7	8.0	7.8
Deformación unitaria	400	----	400	400
Ciclos para falla	230810	----	3345850	1375400
Rigidez	1322	----	1267	1561

Viga 5		Viga 6		Viga 7		Viga 8	
Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura
63.46	51.41	63.65	49.62	63.62	48.43	62.83	49.75
63.70	51.65	63.40	49.50	63.14	49.78	63.34	49.38
63.37	51.02	63.26	49.60	63.21	50.10	63.04	48.68
63.95	51.98	63.60	49.10	63.13	49.16	63.31	50.84
63.73	51.49	63.85	49.89	63.11	49.95	62.86	50.00
63.64	51.51	63.55	49.54	63.24	49.48	63.08	49.73

Tabla A.43. Bloque Las Cóncavas-DGM-AC30-1.

Fecha de mezclado	<u>14/07/2005</u>	Granulometría	<u>DGM2</u>
Agregado	<u>Cóncavas</u>	Temperatura de Mezclado	<u>156-161 °C</u>
Asfalto	<u>AC30</u>	Temperatura de Compactación	<u>146-150 °C</u>

	Unidad	1	2	3	4	5	6
Peso de agregado	g	3686.1	3690.1	3689.3	3694.2	3685.5	3689.2
Porcentaje de Asfalto	%	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3
Peso asfalto calculado	g	269.1	269.4	269.3	269.7	269.0	269.3
Peso asfalto real	g	269.1	269.4	269.4	269.4	269.2	269.5
Temperatura de mezclado	□C	157.4	158.6	154.9	158.8	156.0	154.6
Temperatura de asfalto	□C	156.4	153.7	154.7	160.9	158.6	158.6
Hora	----	08:26	08:29	08:33	08:36	08:38	08:40

Peso seco (Kg)	23.650
Peso sumergido (Kg)	13.200
Peso saturado superficie seca (Kg)	23.700
G bs	2.252
G mm	2.424
%Vacíos	7.08

Inicio de Curado	14/07/2005
Fin de Curado	19/07/2005

Tabla A.44. Vigas Las Cóncavas-DGM-AC30-1.

Fecha de mezclado	<u>14/07/2005</u>	Granulometría	<u>DGM2</u>
Agregado	<u>Cóncavas</u>	Temperatura de Mezclado	<u>156-161 °C</u>
Asfalto	<u>AC30</u>	Temperatura de Compactación	<u>146-150 °C</u>

Viga	1	2	3	4
Peso seco (Kg)	2508.8	2577.8	2554.5	2541.1
Peso sumergido (Kg)	1399.9	1430.2	1415.2	1416.9
Peso saturado superficie seca (Kg)	2514.1	2583.2	2559.9	2546.5
G bs	2.252	2.236	2.232	2.250
G mm	2.424	2.424	2.424	2.424
%Vacíos	7.1	7.8	7.9	7.2
Deformación unitaria	600	600	500	600
Ciclos para falla	214450	241950	131440	22110
Rigidez	1500	1359	1440	1479

Viga 1		Viga 2		Viga 3		Viga 4	
Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura
62.89	49.75	64.02	51.50	63.65	49.76	64.47	49.56
62.85	50.72	63.45	51.21	63.25	50.08	65.01	49.65
62.99	51.36	64.30	51.20	63.95	50.06	64.15	49.95
63.29	51.04	64.00	51.45	63.63	49.58	64.98	49.65
63.52	51.46	64.41	51.14	64.06	50.22	64.40	49.20
63.11	50.87	64.04	51.30	63.71	49.94	64.60	49.60

Tabla A.45. Bloque Las Cóncavas-DGM-AC30-2.

Fecha de mezclado	<u>14/07/2005</u>	Granulometría	<u>DGM2</u>
Agregado	<u>Cóncavas</u>	Temperatura de Mezclado	<u>156-161 °C</u>
Asfalto	<u>AC30</u>	Temperatura de Compactación	<u>146-150 °C</u>

	Unidad	1	2	3	4	5	6
Peso de agregado	g	3688.8	3683.1	3683.3	3688.7	3680.2	3690.4
Porcentaje de Asfalto	%	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3
Peso asfalto calculado	g	269.3	268.9	268.9	269.3	268.7	264.4
Peso asfalto real	g	269.0	268.5	268.5	269.1	268.7	269.6
Temperatura de mezclado	□C	154.0	153.5	154.7	154.3	155.1	155.5
Temperatura de asfalto	□C	155.0	154.0	156.6	156.6	159.3	152.5
Hora	----	08:45	08:48	08:50	08:52	08:57	09:00

Peso seco (Kg)	23.620
Peso sumergido (Kg)	13.160
Peso saturado superficie seca (Kg)	23.690
G bs	2.243
G mm	2.424
%Vacíos	7.46

Inicio de Curado	14/07/2005
Fin de Curado	19/07/2005

Tabla A.46. Vigas Las Cóncavas-DGM-AC30-2.

Fecha de mezclado	<u>14/07/2005</u>	Granulometría	<u>DGM2</u>
Agregado	<u>Cóncavas</u>	Temperatura de Mezclado	<u>156-161 °C</u>
Asfalto	<u>AC30</u>	Temperatura de Compactación	<u>146-150 °C</u>

Viga	5	6	7	8
Peso seco (Kg)	2601.3	2632.3	2618.8	2636.9
Peso sumergido (Kg)	1442.8	1459.3	1451.6	1462.3
Peso saturado superficie seca (Kg)	2609.0	2638.0	2624.6	2644.7
G bs	2.231	2.233	2.233	2.230
G mm	2.424	2.424	2.424	2.424
%Vacíos	8.0	7.9	7.9	8.0
Deformación unitaria	600	500	400	400
Ciclos para falla	44660	307180	566730	1320360
Rigidez	1870	1666	1740	1590

Viga 5		Viga 6		Viga 7		Viga 8	
Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura
62.51	50.60	63.70	50.95	63.67	50.75	63.94	50.82
62.38	51.52	63.70	50.85	63.52	50.70	63.93	51.05
62.40	51.29	64.05	50.53	63.57	50.13	63.96	50.32
62.55	50.29	63.99	50.50	63.84	50.80	64.60	51.05
62.58	50.93	64.09	50.50	63.57	50.68	64.22	50.93
62.48	50.93	63.91	50.67	63.63	50.61	64.13	50.83

Tabla A.47. Bloque Las Cóncavas-SMA-AC30-1.

Fecha de mezclado	<u>14/07/2005</u>	Granulometría	<u>SMA3</u>
Agregado	<u>Cóncavas</u>	Temperatura de Mezclado	<u>156-161 °C</u>
Asfalto	<u>AC30</u>	Temperatura de Compactación	<u>146-150 °C</u>

	Unidad	1	2	3	4	5	6
Peso de agregado	g	3710.8	3704.6	3702.8	3703.9	3697.2	3707.6
Porcentaje de Asfalto	%	5.93	5.93	5.93	5.93	5.93	5.93
Peso asfalto calculado	g	214.8	214.4	214.3	214.4	214.0	214.6
Peso asfalto real	g	214.5	214.4	214.5	214.5	214.0	214.6
Temperatura de mezclado	□C	160.2	158.6	158.6	158.6	158.6	157.2
Temperatura de asfalto	□C	158.6	157.4	154.6	153.6	154.3	155.1
Hora	----	09:05	09:08	09:15	09:18	09:21	09:23

Peso seco (Kg)	23.400
Peso sumergido (Kg)	13.200
Peso saturado superficie seca (Kg)	23.490
G bs	2.274
G mm	2.462
%Vacíos	7.63

Inicio de Curado	14/07/2005
Fin de Curado	19/07/2005

Tabla A.48. Vigas Las Cóncavas-SMA-AC30-1.

Fecha de mezclado	<u>14/07/2005</u>	Granulometría	<u>SMA3</u>
Agregado	<u>Cóncavas</u>	Temperatura de Mezclado	<u>156-161 °C</u>
Asfalto	<u>AC30</u>	Temperatura de Compactación	<u>146-150 °C</u>

Viga	1	2	3	4
Peso seco (Kg)	2610.2	2601.5	2629.7	2662.3
Peso sumergido (Kg)	1507.5	1472.8	1483.7	1495.3
Peso saturado superficie seca (Kg)	2650.7	2611.2	2635.6	2668.9
G bs	2.283	2.285	2.283	2.268
G mm	2.462	2.462	2.462	2.462
%Vacíos	7.3	7.2	7.3	7.9
Deformación unitaria	600	600	500	500
Ciclos para falla	56220	37950	138460	104320
Rigidez	2363	2016	2456	2081

Viga 1		Viga 2		Viga 3		Viga 4	
Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura
62.61	51.03	63.07	50.62	63.28	51.23	62.82	49.73
62.40	50.88	63.01	51.63	63.24	51.05	62.89	50.88
63.24	50.28	62.61	51.50	63.92	50.14	63.15	50.88
62.50	50.70	63.33	51.88	63.34	51.46	63.14	50.25
63.03	51.23	62.78	50.50	63.29	51.12	63.30	51.29
62.76	50.82	62.96	51.23	63.41	51.00	63.06	50.61

Tabla A.49. Bloque Las Cóncavas-SMA-AC30-2.

Fecha de mezclado	<u>29/07/2005</u>	Granulometría	<u>SMA3</u>
Agregado	<u>Cóncavas</u>	Temperatura de Mezclado	<u>156-161 °C</u>
Asfalto	<u>AC30</u>	Temperatura de Compactación	<u>146-150 °C</u>

	Unidad	1	2	3	4	5	6
Peso de agregado	g	3703.0	3707.3	3705.1	3703.6	3702.6	3702.3
Porcentaje de Asfalto	%	5.93	5.93	5.93	5.93	5.93	5.93
Peso asfalto calculado	g	214.3	214.6	214.5	214.4	214.3	214.6
Peso asfalto real	g	214.2	214.5	214.7	214.5	214.4	214.4
Temperatura de mezclado	□C	163.5	161.1	159.4	158.8	157.9	160.2
Temperatura de asfalto	□C	163.2	159.1	157.4	155.2	155.7	158.6
Hora	----	09:53	09:55	09:58	09:59	10:02	10:05

Peso seco (Kg)	23.410
Peso sumergido (Kg)	13.250
Peso saturado superficie seca (Kg)	23.500
G bs	2.284
G mm	2.462
%Vacíos	7.23

Inicio de Curado	29/07/2005
Fin de Curado	03/08/2005

Tabla A.50. Vigas Las Cóncavas-SMA-AC30-2.

Fecha de mezclado	<u>29/07/2005</u>	Granulometría	<u>SMA3</u>
Agregado	<u>Cóncavas</u>	Temperatura de Mezclado	<u>156-161 °C</u>
Asfalto	<u>AC30</u>	Temperatura de Compactación	<u>146-150 °C</u>

Viga	5	6	7	8
Peso seco (Kg)	2477.3	2545.1	2563.5	2534.5
Peso sumergido (Kg)	1427.0	1471.9	1480.6	1459.3
Peso saturado superficie seca (Kg)	2512.5	2585.8	2596.6	2573.8
G bs	2.282	2.285	2.297	2.274
G mm	2.462	2.462	2.462	2.462
%Vacíos	7.3	7.2	6.7	7.6
Deformación unitaria	400	400	400	----
Ciclos para falla	229120	131650	562770	----
Rigidez	1649	2305	2328	----

Viga 5		Viga 6		Viga 7		Viga 8	
Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura
62.99	48.66	63.31	51.43	63.18	50.74	64.19	49.55
63.50	49.15	63.65	51.00	62.87	51.10	64.60	50.12
63.21	49.05	63.70	49.74	62.90	50.91	64.00	49.01
63.72	49.68	63.22	51.09	63.18	50.39	64.70	50.40
63.44	49.42	63.11	50.74	63.14	50.89	64.19	50.16
63.37	49.19	63.40	50.80	63.05	50.81	64.34	49.85

Tabla A.51. Bloque Las Cóncavas-SMA-PG70-1.

Fecha de mezclado	<u>19/07/2005</u>	Granulometría	<u>SMA3</u>
Agregado	<u>Cóncavas</u>	Temperatura de Mezclado	<u>163-169 °C</u>
Asfalto	<u>PG70</u>	Temperatura de Compactación	<u>153-157 °C</u>

	Unidad	1	2	3	4	5	6
Peso de agregado	g	3712.1	3715.5	3713.2	3612.2	3707.5	3710.9
Porcentaje de Asfalto	%	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6
Peso asfalto calculado	g	202.6	202.8	202.7	197.0	202.4	202.5
Peso asfalto real	g	202.7	202.9	202.5	197.0	202.4	202.6
Temperatura de mezclado	□C	162.1	162.3	160.3	170.0	163.6	163.1
Temperatura de asfalto	□C	164.3	165.5	167.1	164.0	164.3	164.3
Hora	----	12:42	12:45	12:48	12:50	12:54	12:57

Peso seco (Kg)	23.300
Peso sumergido (Kg)	13.200
Peso saturado superficie seca (Kg)	23.400
G bs	2.284
G mm	2.476
%Vacíos	7.74

Inicio de Curado	19/07/2005
Fin de Curado	24/07/2005

Tabla A.52. Vigas Las Cóncavas-SMA-PG70-1.

Fecha de mezclado	<u>19/07/2005</u>	Granulometría	<u>SMA3</u>
Agregado	<u>Cóncavas</u>	Temperatura de Mezclado	<u>163-169 °C</u>
Asfalto	<u>PG70</u>	Temperatura de Compactación	<u>153-157 °C</u>

Viga	1	2	3	4
Peso seco (Kg)	2609.3	2559.5	2608.5	2607.3
Peso sumergido (Kg)	1517	1486.1	1510.1	1512.1
Peso saturado superficie seca (Kg)	2647.3	2600.6	2643.5	2650.8
G bs	2.309	2.297	2.301	2.290
G mm	2.476	2.476	2.476	2.476
%Vacíos	6.8	7.2	7.0	7.5
Deformación unitaria	600	600	500	500
Ciclos para falla	18980	13690	71210	40500
Rigidez	1861	1695	1715	1693

Viga 1		Viga 2		Viga 3		Viga 4	
Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura
62.58	50.68	63.17	50.55	63.00	51.42	63.27	50.28
62.84	51.38	63.65	50.28	62.89	51.29	62.82	51.13
62.77	50.22	63.27	50.39	63.10	50.45	63.36	50.70
63.04	51.33	63.43	49.91	63.44	51.10	63.40	50.60
62.88	51.00	63.32	50.14	63.31	51.11	63.70	51.20
62.82	50.92	63.37	50.25	63.15	51.07	63.31	50.78

Tabla A.53. Bloque Las Cóncavas-SMA-PG70-2.

Fecha de mezclado	<u>19/07/2005</u>	Granulometría	<u>SMA3</u>
Agregado	<u>Cóncavas</u>	Temperatura de Mezclado	<u>163-169 °C</u>
Asfalto	<u>PG70</u>	Temperatura de Compactación	<u>153-157 °C</u>

	Unidad	1	2	3	4	5	6
Peso de agregado	g	3708.6	3712.0	3712.5	3712.0	3709.6	3711.0
Porcentaje de Asfalto	%	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6
Peso asfalto calculado	g	202.4	202.6	202.7	202.6	202.5	202.6
Peso asfalto real	g	202.6	202.7	202.8	202.7	203.0	202.5
Temperatura de mezclado	□C	163.4	165.5	166.1	163.2	159.5	159.3
Temperatura de asfalto	□C	165.6	167.6	166.9	165.4	163.0	163.5
Hora	----	01:05	01:09	01:10	01:14	01:19	01:23

Peso seco (Kg)	23.400
Peso sumergido (Kg)	13.250
Peso saturado superficie seca (Kg)	23.490
G bs	2.285
G mm	2.476
%Vacíos	7.71

Inicio de Curado	19/07/2005
Fin de Curado	24/07/2005

Tabla A.54. Vigas Las Cóncavas-SMA-PG70-2.

Fecha de mezclado	<u>19/07/2005</u>	Granulometría	<u>SMA3</u>
Agregado	<u>Cóncavas</u>	Temperatura de Mezclado	<u>163-169 °C</u>
Asfalto	<u>PG70</u>	Temperatura de Compactación	<u>153-157 °C</u>

Viga	5	6	7	8
Peso seco (Kg)	2514.8	2745.5	2535.1	2574.9
Peso sumergido (Kg)	1462	1591.2	1464.7	1489.3
Peso saturado superficie seca (Kg)	2556.4	2772.4	2568.8	2612.7
G bs	2.298	2.324	2.296	2.292
G mm	2.476	2.476	2.476	2.476
%Vacíos	7.2	6.1	7.3	7.4
Deformación unitaria	400	400	----	----
Ciclos para falla	248970	183880	----	----
Rigidez	1964	3106	----	----

Viga 5		Viga 6		Viga 7		Viga 8	
Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura	Espesor	Altura
62.15	49.30	63.83	50.72	62.62	50.22	63.13	51.27
62.70	49.57	63.86	50.75	62.91	49.92	62.80	50.72
63.08	49.43	63.96	50.17	62.30	49.95	63.12	49.93
62.15	49.96	64.18	50.98	63.34	50.27	62.94	50.78
62.99	49.35	63.86	50.66	62.93	50.03	63.32	50.32
62.61	49.52	63.94	50.66	62.82	50.08	63.06	50.60

A.3. Anexo 3

Análisis estadístico y generación de modelos.

Tabla A.55. Observaciones analizadas estadísticamente.

Obs	NF	DEF	VMA	TPO	FTE	Obs	NF	DEF	VMA	TPO	FTE
1	8370	A	BAJO	DAC	B	35	37950	A	MED	SAC	C
2	293580	B	BAJO	DAC	B	36	562770	B	MED	SAC	C
3	78330	B	BAJO	DAC	B	37	229120	B	MED	SAC	C
4	64490	M	BAJO	DAC	B	38	138460	M	MED	SAC	C
5	45670	M	BAJO	DAC	B	39	104320	M	MED	SAC	C
6	17000	A	BAJO	DAS	B	40	18980	A	BAJO	SPG	C
7	12280	A	BAJO	DAS	B	41	13690	A	BAJO	SPG	C
8	250390	B	BAJO	DAS	B	42	248970	B	BAJO	SPG	C
9	184430	B	BAJO	DAS	B	43	183880	B	BAJO	SPG	C
10	47990	M	BAJO	DAS	B	44	71210	M	BAJO	SPG	C
11	41150	M	BAJO	DAS	B	45	40500	M	BAJO	SPG	C
12	78360	A	ALTO	SAC	B	46	11740	A	BAJO	DAC	G
13	39520	A	ALTO	SAC	B	47	11430	A	BAJO	DAC	G
14	27780	B	ALTO	SAC	B	48	220840	B	BAJO	DAC	G
15	172100	M	ALTO	SAC	B	49	136360	B	BAJO	DAC	G
16	166550	M	ALTO	SAC	B	50	66680	M	BAJO	DAC	G
17	15790	A	ALTO	SPG	B	51	64320	M	BAJO	DAC	G
18	13350	A	ALTO	SPG	B	52	12820	A	BAJO	DAS	G
19	270040	B	ALTO	SPG	B	53	10990	A	BAJO	DAS	G
20	167030	B	ALTO	SPG	B	54	244470	B	BAJO	DAS	G
21	39120	M	ALTO	SPG	B	55	110770	B	BAJO	DAS	G
22	35640	M	ALTO	SPG	B	56	44980	M	BAJO	DAS	G
23	44660	A	BAJO	DAC	C	57	28420	M	BAJO	DAS	G
24	22110	A	BAJO	DAC	C	58	42100	A	MED	SAC	G
25	1320360	B	BAJO	DAC	C	59	38330	A	MED	SAC	G
26	566730	B	BAJO	DAC	C	60	294670	B	MED	SAC	G
27	307180	M	BAJO	DAC	C	61	177480	B	MED	SAC	G
28	131440	M	BAJO	DAC	C	62	84600	M	MED	SAC	G
29	43970	A	BAJO	DAS	C	63	84510	M	MED	SAC	G
30	3345850	B	BAJO	DAS	C	64	49800	A	MED	SPG	G
31	1375400	B	BAJO	DAS	C	65	48970	A	MED	SPG	G
32	357190	M	BAJO	DAS	C	66	162130	B	MED	SPG	G
33	214690	M	BAJO	DAS	C	67	156990	B	MED	SPG	G
34	56220	A	MED	SAC	C	68	133470	M	MED	SPG	G

Tabla A.56. Variables Analizadas.

Class	Levels	Values
FTE	3	B C G
TPO	4	DAC DAS SAC SPG
VMA	3	ALTO BAJO MED
DEF	3	A B M

Tabla A.57. Resultados estadísticos.

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	35	1.1539906E13	329711594152	4.47	<.0001
Error	32	2.3613529E12	73792277777		
Corrected Total	67	1.3901259E13			
	R-Square	Coeff Var	Root MSE	NF Mean	
	0.830134	134.4253	271647.3	202080.6	

Tabla A.58. Análisis de varianza de todos las mezclas.

Analysis of Variance					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	3	66.57158	22.19053	35.70	<.0001
Error	64	39.77631	0.62150		
Corrected Total	67	106.34789			
	Root MSE	0.78836	R-Square	0.6260	
	Dependent Mean	11.30886	Adj R-Sq	0.6084	
	Coeff Var	6.97114			

Tabla A.59. Parámetros estimados para todas las mezclas.

Parameter Estimates							
Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	t Value	Pr > t	Type I SS	Type II SS
Intercept	1	-116.65603	83.09803	-1.40	0.1652	8696.53638	1.22483
LGDEF	1	21.05256	13.40262	1.57	0.1212	63.24744	1.53347
LGMR	1	19.58220	9.89040	1.98	0.0520	0.81119	2.43635
MRDEF	1	-3.20804	1.59540	-2.01	0.0486	2.51296	2.51296

Tabla A.60. Análisis de varianza para mezclas densas.

Analysis of Variance						
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F	
Model	5	70.89694	14.17939	79.55	<.0001	
Error	28	4.99095	0.17825			
Corrected Total	33	75.88789				
	Root MSE	0.42219	R-Square	0.9342		
	Dependent Mean	11.35212	Adj R-Sq	0.9225		
	Coeff Var	3.71908				

Tabla A.61. Parámetros estimados para las mezclas densas.

Parameter Estimates							
Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	t Value	Pr > t	Type I SS	Type II SS
Intercept	1	7666.36556	754.38632	10.16	<.0001	4381.60516	18.40843
LGDEF	1	-7.26361	0.44544	-16.31	<.0001	50.25492	47.39624
LGVMA	1	-4414.17297	443.13311	-9.96	<.0001	1.34278	17.68705
LGMR	1	-457.57638	44.76142	-10.22	<.0001	0.62418	18.62708
SQVMA	1	566.19134	59.20558	9.56	<.0001	0.01192	16.30145
MRVMA	1	177.77842	17.37398	10.23	<.0001	18.66314	18.66314

Tabla A.62. Análisis de varianza para mezclas SMA.

Analysis of Variance					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	6	22.82221	3.80370	13.67	<.0001
Error	27	7.51049	0.27817		
Corrected Total	33	30.33270			
	Root MSE	0.52741	R-Square	0.7524	
	Dependent Mean	11.26559	Adj R-Sq	0.6974	
	Coeff Var	4.68164			

Tabla A.63. Parámetros estimados para las mezclas SMA.

Parameter Estimates							
Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	t Value	Pr > t	Type I SS	Type II SS
Intercept	1	-343.77981	296.29141	-1.16	0.2561	4315.05853	0.37448
LGDEF	1	1.00127	28.81725	0.03	0.9725	17.43733	0.00033581
LGMR	1	110.15074	60.65628	1.82	0.0805	2.39782	0.91733
LGVMA	1	-57.32300	36.67526	-1.56	0.1297	0.50597	0.67954
DEFVMA	1	8.73545	5.89545	1.48	0.1500	1.18894	0.61072
MRDEF	1	-3.56093	2.29643	-1.55	0.1326	0.64972	0.66885
SQMR	1	-5.41733	3.56473	-1.52	0.1402	0.64242	0.64242