

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y TRANSPORTE

VOLUMEN 4

GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS PARA COSTA RICA

GDP-2020

TOMO II Guía simplificada para el diseño de pavimentos de bajo
volumen de tránsito.

2020

República de Costa Rica

PRÓLOGO

[Se sugiere invitar al Señor Ministro de Obras Públicas y Transportes (MOPT), Ing. Rodolfo Méndez Mata, a escribir el prólogo del presente manual]

Ing. Rodolfo Méndez Mata
Ministro de Obras Públicas y Transportes

TOMO II Guía simplificada para el diseño de pavimentos de bajo volumen de tránsito.

GDP-2020

La Ley de Simplificación y Eficiencia Tributarias N° 8114 del 4 de julio del 2001 y su reglamento al artículo 6 del 13 de febrero del 2012 le asignaron recursos y tareas a la Universidad de Costa Rica, a través del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR). En el Capítulo III del reglamento al artículo 6 de la Ley N° 8114 se establece la actualización del Manual de Especificaciones en materia vial para Costa Rica, conformado por un total de nueve volúmenes, para ser aplicados en todos los trabajos de construcción, mejoramiento, rehabilitación, mantenimiento y ampliación de vías públicas y sus obras complementarias, ya sea aquellos realizados por Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) y sus consejos adscritos, así como por las municipalidades (Art. 25).

Esta legislación persigue el máximo aprovechamiento de los dineros dispuestos por el Estado costarricense para la conservación y construcción de las vías públicas, asignándole al LanammeUCR las labores de investigación, capacitación, evaluación y asistencia técnica del sector vial, en procura de que las funciones que ejecuta el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), sus consejos y otras dependencias públicas alcancen mayor eficiencia y eficacia en la tarea de reconstruir, rehabilitar y conservar el patrimonio vial nacional.

El proceso de elaboración y revisión del *TOMO II Guía simplificada para el diseño de pavimentos de bajo volumen de tránsito.*, correspondiente al *Volumen 4 Guía de diseño estructural de pavimentos para Costa Rica (GDP-2020)* del Manual de Especificaciones. se realizó de conformidad con el Capítulo III, Sección III, artículo N°38 del Reglamento al artículo 6 de la Ley de Simplificación y Eficiencia Tributaria N°8114, Decreto Ejecutivo N°37016-MOPT.

Equipo coordinador Ing. Eliécer Arias Barrantes

Unidad de Normativa y
Actualización Técnica-
PITRA, LanammeUCR

Equipo de elaboración Ing. Eliécer Arias Barrantes

Equipo de colaboración Ing. Daniel Clark Araya
Ing. Robinson Puello Bolaños
Fabricio Murillo Quesada
Santiago Tautiva Ibañez

La revisión y aprobación de la guía GDP-2020 para su oficialización, en sus tres tomos que la componen, se realizó de conformidad con la, Sección III Procedimiento para la oficialización del Manual de Especificaciones, del DE-37016-MOPT, a través de:

**Equipo de revisión y
aprobación** Comisión Revisora de los
Proyectos de Actualización del
Manual de Especificaciones del
MOPT (CRPAME)

PREFACIO

El Volumen 4 del Manual de Especificaciones, denominado Guía de diseño estructural de pavimentos para Costa Rica, GDP-2020, está compuesto por tres tomos:

- Tomo I: Guía mecánica empírica para el diseño de pavimentos.
- Tomo II: Guía simplificada para el diseño de pavimentos de bajo volumen de tránsito.
- Tomo III: Guía mecánica empírica para el diseño de pavimentos rígidos.

El presente documento corresponde a una guía de diseño simplificado de pavimentos flexibles y semirrígidos para caminos con bajos volúmenes de tránsito. La estimación de las diferentes variables que se emplearán para el diseño de las estructuras de pavimento se realizó con base en datos recolectados por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), a través de la Unidad de Gestión Municipal.

El detalle de los resultados presentados en este documento puede consultarse en el informe LM-PI-UMP-103-R1 (Arias, 2019) y la propuesta de investigación LM-PI-GM-INF-05-16 (Arias, 2017)

Esta guía presenta un catálogo de diseño con distintos tipos de estructuras de pavimento para determinada vida útil, que depende del tránsito promedio diario, del porcentaje de vehículos pesados y de la capacidad soportante de la subrasante. En el proyecto de investigación que dio origen a la presente guía, se desarrolló una metodología para el diseño de estructuras de pavimento que cumple con los criterios mínimos de desempeño funcional y estructural, buscando mantener los estándares de calidad adecuados sin tener que realizar un diseño detallado de la estructura, permitiendo así un ahorro de recursos para los distintos entes que necesiten construir una vía de bajo volumen.

El método se podría utilizar tanto en vías nacionales como cantonales, siempre y cuando se cumplan los principios básicos y se cuente con las variables disponibles, las cuales están asociadas a: período de diseño en años, tráfico vehicular, porcentaje de vehículos pesados y CBR (obtenido en laboratorio y verificado en sitio) de la subrasante. Con estas variables se determinó una demanda a cumplir por parte de las estructuras analizadas.

El trabajo acá expuesto es el resumen de 450 modelaciones por medio de la metodología de multicapa elástica, verificaciones por desempeño a fatiga para mezcla asfáltica, bases estabilizadas y ahuellamiento en las capas inferiores, para 15 estructuras de pavimento diferentes y para las condiciones de subrasantes consideradas, dando como resultado 9 estructuras que podrían cumplir con diferentes condiciones de demanda. Como complemento a este trabajo se encuentra el desarrollo de una herramienta de cómputo que permite realizar la selección de la estructura de una forma ágil y simple a la vez que permite verificar los principios básicos de diseño. De ser necesario en actualizaciones futuras se pueda ampliar el período de diseño, tipo de pavimentos y abanico de opciones.

El presente manual Volumen 4 responde al cumplimiento del artículo N°20 del Reglamento al artículo 6 de la ley de simplificación y eficiencia tributaria N°8114, N°37016-MOPT sobre competencias del LanammeUCR, al cual le corresponde desarrollar las acciones pertinentes para actualizar el conjunto de documentos que integran el Manual de Especificaciones, del artículo N°25 en el que se especifica la elaboración de una Guía de diseño estructural de pavimentos para Costa Rica, y el artículo N°29, en el que se prevé que dicha guía de diseño estructural de pavimentos, incluya un manual específico o guía sobre diseño simplificado para caminos de bajo volumen.

Como toda ciencia, la ingeniería vial está en permanente cambio y renovación, lo que promueve a innovar, mejorar, ampliar o sustituir las disposiciones contenidas en esta guía. Es por ello, que la preocupación de mantenerla al día, debe ser una constante en las labores que desarrollen todos los profesionales y técnicos ligados, de una u otra forma, al quehacer de las carreteras y obras conexas. Sin embargo, como cuestión de procedimiento y ordenamiento general, toda modificación remitida a el LanammeUCR, a Comisión Permanente de Revisión del Manual de Especificaciones ya sea de su propia iniciativa o de otros, será tramitada según lo dispone el Capítulo III del Reglamento al artículo 6 de la Ley de Simplificación y Eficiencia Tributaria N°8114, Decreto Ejecutivo N°37016-MOPT.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|------|
| Prólogo | i |
| Prefacio | iv |
| Índice general | vi |
| Índice de tablas..... | viii |
| Índice de figuras | x |
| Glosario | xi |
| Abreviaturas | xv |
| Capítulo 1: Requerimientos previos de diseño..... | 2 |
| Sección 101: Generalidades | 2 |
| Sección 102: Requerimientos de tránsito..... | 2 |
| 102.01: Tránsito promedio Diario | 2 |
| 102.02: Tránsito Promedio Diario Anual (TPDA)..... | 3 |
| 102.03: Tipos de Conteos..... | 3 |
| 102.04: Contadores Manuales | 4 |
| 102.05: Contadores de radar | 4 |
| 102.06: Contadores de neumático | 4 |
| 102.07: Factores de Expansion Horaria (FEH)..... | 7 |
| 102.08: Factores de Expansion Diaria (FED)..... | 7 |
| 102.09: Factores de Expansion Mensual (FEM) | 7 |
| Sección 103: Requerimientos Mínimos de Diseño para Materiales en Pavimentos..... | 8 |
| 103.01: Superficie de Rodamiento | 10 |
| 103.02: Base y Subbase | 11 |
| 103.03: Subrasante..... | 12 |
| Capítulo 2: Diseño Estructural | 16 |
| Sección 201: Generalidades | 16 |
| Sección 202: Variables de Diseño..... | 16 |
| 202.01: Tránsito promedio Diario | 16 |
| 202.02: CBR de la Subrasante | 17 |
| 202.03: Porcentaje de Vehículos Pesados..... | 18 |
| 202.04: Ejes Equivalentes de Diseño (ESALs)..... | 18 |
| 202.05: Estructuras de Pavimento | 20 |
| Capítulo 3: Selección de la Estructura | 25 |
| Sección 301: Generalidades | 25 |

| | |
|---|-----|
| Sección 302: Catálogo de Estructuras | 25 |
| Sección 303: Consideraciones Finales | 33 |
| Referencias | 35 |
| Anexo | A1 |
| Anexo 1. Estaciones Meteorológicas Consideradas | A1 |
| Anexo 2. Módulo Dinámico | A6 |
| Anexo 3. Vista Preliminar Herramienta de Diseño | A10 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 102-1. Esquema de distribución vehicular según la Federal Highway Administration (FHWA de Estados Unidos | 5 |
| Tabla 102-2. Tipos de vehículo según la Federal Highway Administration (FHWA) de Estados Unidos..... | 6 |
| Tabla 102-3. Ejemplo de valores de FEM medidos en la red vial nacional..... | 8 |
| Tabla 103-1. Ensayos para caracterizar agregados de la superficie de rodamiento..... | 10 |
| Tabla 103-2. Ensayos de diseño de mezcla asfáltica para determinación y normativa interna | 11 |
| Tabla 103-3. Ensayos para materiales granulares | 12 |
| Tabla 103-4. Cantidad de ensayos requeridos para caracterizar la subrasante | 13 |
| Tabla 103-5. Ensayos para suelos que conforman subrasantes | 14 |
| Tabla 202-1. ESALs para el periodo de diseño de 6 años de acuerdo con las diferentes combinaciones de TPD y Pesados | 19 |
| Tabla 202-2. ESALs para el periodo de diseño de 8 años de acuerdo con las diferentes combinaciones de TPD y Pesados | 19 |
| Tabla 202-3. ESALs para el periodo de diseño de 10 años de acuerdo con las diferentes combinaciones de TPD y Pesados | 19 |
| Tabla 202-4. ESALs para el periodo de diseño de 12 años de acuerdo con las diferentes combinaciones de TPD y Pesados | 20 |
| Tabla 302-1. Resumen de estructuras seleccionadas para la guía de diseño de bajo volumen | 25 |
| Tabla 302-2. Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 6 años y módulo resiliente de 4500 psi (CBR = 3%) | 26 |
| Tabla 302-3. Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 6 años y módulo resiliente de 6000 psi (CBR = 4%) | 26 |
| Tabla 302-4. Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 6 años y módulo resiliente de 9000 psi (CBR = 6%) | 27 |
| Tabla 302-5. Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 6 años y módulo resiliente de 12500 psi (CBR = 9%)..... | 27 |
| Tabla 302-6. Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 6 años y módulo resiliente de 14200 psi (CBR = 11%)..... | 27 |

| | |
|---|----|
| Tabla 302-7. Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 8 años y módulo resiliente de 4500 psi (CBR = 3%) | 28 |
| Tabla 302-8. Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 8 años y módulo resiliente de 6000 psi (CBR = 4%) | 28 |
| Tabla 302-9. Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 8 años y módulo resiliente de 9000 psi (CBR = 6%) | 28 |
| Tabla 302-10. Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 8 años y módulo resiliente de 12500 psi (CBR = 9%)..... | 29 |
| Tabla 302-11. Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 8 años y módulo resiliente de 14200 psi (CBR = 11%)..... | 29 |
| Tabla 302-12. Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 10 años y módulo resiliente de 4500 psi (CBR = 3%) | 30 |
| Tabla 302-13. Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 10 años y módulo resiliente de 6000 psi (CBR = 4%) | 30 |
| Tabla 302-14. Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 10 años y módulo resiliente de 9000 psi (CBR = 6%) | 30 |
| Tabla 302-15. Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 10 años y módulo resiliente de 12500 psi (CBR = 9%)..... | 31 |
| Tabla 302-16. Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 10 años y módulo resiliente de 14200 psi (CBR = 11%)..... | 31 |
| Tabla 302-17. Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 12 años y módulo resiliente de 4500 psi (CBR = 3%) | 31 |
| Tabla 302-18. Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 12 años y módulo resiliente de 6000 psi (CBR = 4%) | 32 |
| Tabla 302-19. Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 12 años y módulo resiliente de 9000 psi (CBR = 6%) | 32 |
| Tabla 302-20. Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 12 años y módulo resiliente de 12500 psi (CBR = 9%)..... | 32 |
| Tabla 302-21. Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 12 años y módulo resiliente de 14200 psi (CBR = 11%)..... | 33 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 102-1. Ejemplo de contador de radar en sitio..... | 4 |
| Figura 102.2. Ejemplo de contador de mangueras en sitio..... | 5 |
| Figura 103-1. Ejemplo de estructura típica de un pavimento flexible..... | 9 |
| Figura 103-2. Ejemplo de estructura típica de un pavimento semirrígido | 9 |
| Figura 202-1. Distribución porcentual del CBR de subrasante | 17 |

GLOSARIO

Agregado: Material granular con composición mineralógica que puede ser arena, grava, roca triturada, o escoria, con tamaño de carácter variable. Se define como “fino” a aquel cuyo tamaño máximo pasa por el tamiz de 4,75 mm (No. 4), y como “grueso” a aquel que queda retenido en el tamiz 4,75 mm (No. 4).

Autobús: Vehículo automotor con la capacidad de realizar transporte de personas, con capacidad superior a 44 plazas, incluyendo al conductor.

Base: Material constituido por partículas duras y durables que se encuentran inmediatamente debajo de la capa superficial o de una capa intermedia. Puede estar compuesta de escoria triturada, roca triturada, grava y arena triturada o cualquier combinación de estos materiales, que cumple con la normativa vigente. Puede ser tratada con ligantes bituminosos, cemento hidráulico o aditivos químicos.

Calzada: Sección del derecho de vía destinada a la circulación vehicular, la cual puede incluir uno o más carriles de circulación (no incluye el espaldón).

Capa: Riego continuo de un material específico, con un mismo esfuerzo de compactación en toda su extensión.

Carretera o camino: Toda vía pública abierta a la circulación de vehículos, peatones y demás usuarios, que permite el tránsito.

Carril de tránsito: Subdivisión de la superficie de rodamiento, sobre la cual se permite el tránsito de una fila de vehículos, en un solo sentido, su ancho varía entre 3 m como mínimo, y 3,6 m como valor recomendable.

Cemento asfáltico: Material cementante con color predominantemente oscuro, cuyos constituyentes principales corresponden a bitúmenes de carácter natural, u obtenidos mediante diversos procesos del asfalto.

Compactación: Proceso mecánico con el fin de comprimir un volumen dado de material en otro más pequeño, que se logra usando rodillos o compactadoras especiales según sea el tipo de obra y la etapa del proceso constructivo.

Derecho de vía: Área o superficie de terreno, propiedad del Estado, destinada al uso de una vía pública, con zonas adyacentes utilizadas para todas las instalaciones y obras complementarias, áreas previstas para futuras obras de ensanche o mejoramiento, así como zonas de seguridad para el usuario. Esta área está delimitada a ambos lados por los linderos de las propiedades colindantes.

Diseño de mezcla: Procedimientos de laboratorio que tienen como propósito determinar (dentro de los límites de las especificaciones de proyecto) una graduación de agregado mineral y un contenido de ligante o de cemento, que produzcan una mezcla que logre un balance entre todas las propiedades deseadas.

Drenaje: Estructura que se coloca o se construye para disponer y evacuar las aguas superficiales.

Eje sencillo: Conocido también como eje simple, corresponde a aquel que no forma parte de un conjunto de ejes, se encuentra compuesto por una o dos llantas en cada extremo.

Eje tándem: Conocido también como eje doble, corresponde a aquel conjunto de dos ejes consecutivos del mismo vehículo, unidos mediante algún dispositivo mecánico o neumático,

que permitan una distribución de carga no menor a 40% por eje, y una separación entre centros de ejes mayor a 1,20 m y menor a 2,40 m, se encuentra compuesto por dos o cuatro llantas en cada extremo.

Eje trídrem: Corresponde a aquel conjunto de tres ejes consecutivos del mismo vehículo, unidos mediante algún dispositivo mecánico o neumático, que permitan una distribución de carga no menor a 28 % por eje, y una separación entre centros de ejes mayor a 1,20 m y menor a 2,40 m, se encuentra compuesto por tres o seis llantas en cada extremo.

Emulsión asfáltica: Es una dispersión de cemento asfáltico y agua que contiene una pequeña cantidad de agente emulsionante. Es un sistema heterogéneo que normalmente contiene dos fases inmiscibles (asfalto y agua) en donde el agua forma la fase continua de la emulsión y pequeños glóbulos de asfalto forma la fase discontinua. La emulsión de asfalto puede ser de tipo aniónico (glóbulos cargados negativamente) o catiónica (glóbulos cargados positivamente), dependiendo del agente emulsionante.

Especificaciones: Término utilizado para referirse a las disposiciones, normativas y diversos requisitos técnicos y de ley que rigen la ejecución de una obra específica.

Estabilidad: Capacidad de un cuerpo de resistir la deformación ante la imposición de cargas, esta es función de las características de cohesión y fricción del material en cuestión.

Estabilización: Proceso que modifica las propiedades fisicoquímicas de un material (suelo o granular), con el fin primordial de aumentar su resistencia mecánica, otorgándole cierto grado de rigidez. Este proceso se logra con la incorporación de un estabilizador (cal, cemento o emulsión asfáltica), en la cantidad que establezca el diseño de mezcla realizado para tales efectos.

Estructura del pavimento: Estructura constituida por un conjunto de capas superpuestas, de diferentes materiales, adecuadamente compactados, que se construyen sobre la subrasante de la vía con el objeto de soportar y distribuir las cargas del tránsito proyectadas para un período de varios años, según lo dicte el diseño elaborado por un profesional en el área; brindando una superficie de rodamiento uniforme, cómoda y segura. Puede estar compuesta por capa de rodamiento, base y subbase.

Lastre: Material granular clasificado, que se coloca sobre una subrasante para protegerla, o bien sobre una capa granular terminada de una carretera para que funcione como una superficie de ruedo expuesta. Puede ser material de tajo, río o préstamo

Material: Materia prima, con características específicas, utilizada para conformar las diferentes estructuras requeridas.

Material insatisfactorio: Material con características que no cumplen con las especificaciones mínimas de la estructura requerida.

Material satisfactorio: Material con características que si cumplen con las especificaciones mínimas de la estructura requerida.

Mejoramiento de propiedades físicas: Proceso que modifica las propiedades físicas de un material (suelo o granular), con el fin primordial de mejorar sus condiciones de plasticidad o granulometría. Con este proceso no se pretende aumentar la resistencia mecánica del material, tal y como efectivamente sucede con el proceso de estabilización. Este procedimiento, según sea el propósito, se puede realizar de dos formas:

Mecánico: Por medio de la adición de cierta cantidad de material (suelo o granular), determinado por el diseño realizado para este fin, a otro material que presenta incumplimiento en la granulometría o un índice de plasticidad por debajo del rango de las especificaciones técnicas requeridas.

Fisicoquímico: Por medio de la adición de cierta cantidad de material estabilizante (cal, cemento, emulsión, etc.), determinada por el diseño realizado para este fin, a otro material que presenta índices de plasticidad por encima del rango de las especificaciones requeridas. Se puede utilizar cuando la capacidad de soporte (CBR) es levemente inferior al requerido por las especificaciones técnicas requeridas, con la incorporación de muy pequeñas cantidades de estabilizador (cal, cemento o emulsión asfáltica).

Mezcla asfáltica en caliente: Mezcla de alta temperatura de cemento asfáltico y agregado de buena graduación, con altas características de calidad, dispuesta a formar una capa resistente y durable, que cumpla con las especificaciones que rijan.

Rasante: Línea que representa, en proyección vertical, la superficie de carreteras, puentes u otras obras en general. Normalmente coincide con el eje longitudinal de la misma.

Remolque: Vehículo sin auto tracción, cuyo fin es el transporte de productos mediante el impulso de otro vehículo.

Remolque liviano: Vehículo sin auto tracción, cuyo fin es el transporte de productos, con un peso máximo de 750 kg, mediante el impulso de otro vehículo.

Remolque pesado: Vehículo sin auto tracción, cuyo fin es el transporte de productos, con un peso mayor a 750 kg, mediante el impulso de otro vehículo.

Semirremolque: Vehículo sin auto tracción, cuyo fin es el transporte de productos, mediante el acople a un tractocamión o cabezal, de manera que el peso y carga se distribuyen parcialmente sobre este.

Subbase: Capa secundaria de distribución de carga, se encuentra ubicada bajo la capa de base o la superficie de pavimento, y sobre la subrasante o el material seleccionado como soporte de la base. Es de una calidad superior al de la subrasante, que se especifica en términos de granulometría, condiciones de plasticidad y resistencia. Tiene por objeto: servir de capa de drenaje al pavimento, controlar o eliminar en lo posible cambios de volumen, elasticidad y plasticidad perjudiciales que pudiera tener el material de la subrasante, controlar la ascensión capilar del agua provenientes de las capas friáticas cercanas protegiendo así al pavimento contra los hinchamientos que se producen en época lluviosa. Puede estar compuesta por grava natural sin procesar, arena, arcilla, o una mezcla de estas.

Subrasante: Superficie del terreno, ya sea en corte o relleno, sobre la que se colocan las diferentes capas de material que constituyen el pavimento de una carretera o camino.

Superficie de rodamiento: Capa superior de la estructura del pavimento, su función es proporcionar una superficie uniforme y segura al rodamiento de los vehículos. Debe soportar el intemperismo, tener suficiente resistencia tanto al desgaste como a la fractura para soportar las cargas del tránsito consideradas en el diseño de la estructura del pavimento. Debe ser antiderrapante y no deformable.

Valor relativo de soporte (CBR) (*California Bearing Ratio*): Método de laboratorio utilizado para determinar un valor relativo de soporte de carga de los materiales. Corresponde a una cuantificación de la resistencia del suelo a la penetración, tomando

como referencia a la piedra triturada. El valor de CBR se encuentra en función del contenido de agua, la densidad compactada y la textura del suelo en estudio.

Vehículo: Cualquier medio utilizado para el transporte de personas o bienes.

Vehículo articulado: Vehículo compuesto por un vehículo automotor y uno o dos remolques unidos mediante una articulación que permite la transmisión de la carga.

Vehículo automotor: Cualquier tipo de vehículo que posea algún dispositivo mecánico que genere tracción.

Vehículo de carga: Vehículo automotor con la capacidad de realizar el transporte de bienes y personas.

Vehículo de carga liviana: Vehículo automotor con la capacidad de realizar el transporte de bienes y personas con un peso máximo de 8 toneladas.

Vehículo de carga pesada: Vehículo automotor con la capacidad de realizar el transporte de bienes y personas con un peso de más de 8 toneladas.

Vehículo tipo C2: Vehículo automotor de tipo camión, compuesto por un eje delantero simple de una llanta en cada extremo, con un peso máximo de 6 toneladas, y un eje trasero simple de dos llantas en cada extremo con un peso máximo de 10 toneladas.

Vehículo tipo C2+: Vehículo automotor de tipo camión, compuesto por un eje delantero simple de una llanta en cada extremo y un eje trasero simple de una llanta en cada extremo, con un peso máximo de 6 toneladas, distribuidos entre los dos ejes según fabricación.

Vehículo tipo C3: Vehículo automotor de tipo camión, compuesto por un eje delantero simple de una llanta en cada extremo, con un peso máximo de 6 toneladas y un eje trasero tándem de dos llantas en cada extremo, con un peso máximo de 16,5 toneladas, o un eje trasero combinado, compuesto por un eje simple de dos llantas y un eje simple de una llanta, con un peso máximo de 15 toneladas.

Vehículo tipo C4: Vehículo automotor de tipo camión, compuesto por un eje delantero simple de una llanta en cada extremo, con un peso máximo de 6 toneladas y un eje trasero trídem de dos llantas en cada extremo, con un peso máximo de 23 toneladas, o un eje trasero combinado, compuesto por un eje tándem de dos llantas y un eje simple de una llanta, con un peso máximo de 20 toneladas.

Vehículo tipo T3: Vehículo automotor de tipo tractocamión, compuesto por un eje delantero simple de una llanta en cada extremo, con un peso máximo de 6 toneladas y un eje trasero tándem de dos llantas, con un peso máximo de 16,5 toneladas.

Vehículo tipo S2: Remolque de un eje trasero tándem de dos llantas en cada extremo, con un peso máximo de 16,5 toneladas.

Vida útil: Tiempo estimado para que la estructura construida trabaje sin presentar daños estructurales que comprometan su integridad funcional, en el caso de una carretera, este daño se cuantifica en la superficie de rodamiento, mientras que, en el caso de puentes, pasos elevados, túneles y alcantarillas, se realiza sobre la subestructura y la superestructura.

ABREVIATURAS

AASHTO: Siglas en inglés para American Association of State Highways and Transportation Officials, correspondientes en español a Asociación Americana de Oficiales para Autopistas Estatales y Transporte.

ASTM: Siglas en inglés para American Society for Testing and Materials, correspondientes en español a Sociedad Americana Internacional para Ensayos y Materiales.

CBR: Siglas en inglés para California Bearing Ratio, correspondientes en español a Índice de Capacidad de Soporte.

ESAL: Siglas en inglés para Equivalent Simple Axial Load, correspondientes en español a Eje simple equivalente de carga.

FED: Factor de Expansión Diario.

FEH: Factor de Expansión Horario.

FEM: Factor de Expansión Mensual.

FHWA: Siglas en inglés para *Federal Highway Administration*, correspondientes en español a Administración Federal de Autopistas.

LanammeUCR: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica.

MOPT: Ministerio de Obras Públicas y Transportes.

MR: Módulo resiliente.

NAASRA: Siglas en inglés para National Association of Australian State Road Authorities, correspondientes en español a Asociación Nacional de Autoridades de Caminos Estatales Australianos.

NCHRP: Siglas en inglés para National Cooperative Highway Research Program, correspondientes en español a Programa Nacional de Cooperación para Investigación en Autopistas.

qu : Resistencia a la compresión inconfinaada.

SN: Siglas en inglés para *Structural Number*, correspondientes en español a Número Estructural.

SUCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

TPD: Tránsito Promedio Diario.

TPDA: Tránsito Promedio Diario Anual.

VMA: Siglas en inglés para *Voids in the mineral aggregate*, correspondientes en español a vacíos en el agregado mineral.

Requerimientos previos de diseño

Capítulo 1

CAPÍTULO 1: REQUERIMIENTOS PREVIOS DE DISEÑO

SECCIÓN 101: GENERALIDADES

Para diseñar un pavimento mediante el uso de la presente guía, es necesario contar con los insumos apropiados para obtener un resultado idóneo de acuerdo con los análisis y resultados obtenidos en este documento. Para ello, se presentan a continuación los diferentes requerimientos necesarios, así como las especificaciones mínimas que deben cumplir los materiales de las distintas capas del pavimento.

El objetivo de dichos requisitos es contar con la información mínima necesaria para obtener estructuras de pavimento adecuadas, guiando al diseñador por un proceso simplificado, donde las estructuras resultantes ya han sido analizadas y su desempeño ha sido verificado de previo para cumplir los parámetros del Tomo I: Guía Mecánica Empírica para el Diseño de Pavimentos.

En primera instancia, se trata el tema de los conteos vehiculares, así como las proyecciones de tránsito a futuro. Posteriormente se hace referencia a la caracterización de los materiales que componen la estructura del pavimento, con el fin de definir los lineamientos mínimos de calidad, por último, se mencionan aspectos básicos generales correspondientes a la hidrología de la vía.

SECCIÓN 102: REQUERIMIENTOS DE TRÁNSITO

102.01: TRÁNSITO PROMEDIO DIARIO

La cantidad de vehículos en un periodo de 24 horas que circula por una carretera es lo que se conoce como Tránsito Promedio Diario (TPD) y dicho valor constituye el principal insumo para calcular el tránsito promedio diario anual (TPDA).

Para obtener una cuantificación de este dato, se deben realizar conteos vehiculares en carretera, sobre los cuales se deben considerar previamente ciertos aspectos, estos buscan que los datos obtenidos sean adecuados y correctos, dichos aspectos son:

- Realizar los conteos durante periodos de tránsito normal, evitar realizarlos en vacaciones o días feriados.
- Realizar los conteos entre lunes y viernes, preferiblemente martes, miércoles y jueves, esto para evitar el efecto de fin de semana.
- Realizar conteos de 25 horas o más, es decir, procurar mínimo 24 horas completas de conteos, con horas extras incompletas para contemplar el lapso transcurrido entre el inicio y el final de los conteos, esto para facilitar el cálculo del TPDA.
- Seleccionar los sitios con mayor flujo vehicular de las calles o tramos a evaluar, o los sitios más representativos con base en la jerarquía de las rutas por analizar.
- Realizar conteos semanales en las carreteras más importantes de la zona en estudio, para obtener datos más representativos del comportamiento del tránsito y que las estimaciones de TPDA mediante el uso de factores de expansión diarias (FED) sean más precisas.

Debido a la tasa de cambio que poseen en tipo y en volumen el tránsito vehicular, se recomienda realizar los conteos de manera periódica, aproximadamente cada año o máximo cada dos años. Esto importante debido a que, al realizar los conteos de manera constante, se logra identificar y cuantificar la tasa de crecimiento del tránsito vehicular de la zona en estudio.

102.02: TRÁNSITO PROMEDIO DIARIO ANUAL (TPDA)

El TPDA es uno de los elementos más importantes para realizar el diseño o estudio de una carretera. Este valor corresponde al promedio anual de vehículos que transitan diariamente por una vía. Para cuantificar el TPDA, es necesario conocer los valores de TPD, que fungen como base para realizar la estimación.

Para estimar el valor del TPDA se utiliza la Ecuación 1,

$$TPDA = \frac{TPD \text{ día } i, \text{ mes } k}{FED_i * FEM_k} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

- TPDA: Tránsito promedio diario anual.
- TPD día i, mes k: Tránsito promedio diario completo (o modificado por Factor de expansión horaria FEH, en caso de conteos de unas cuantas horas (según requisitos de la administración), de un día “i” y un mes “k”.
- FED: Factor (o razón) de expansión diario para un día “i”.
- FEM: Factor (o razón) de expansión mensual para un mes “k”.

Los caminos de bajo volumen pueden ser categorizados según el valor de TPDA que poseen, mas no se recomienda considerar esto como un factor decisivo de clasificación para el diseño estructural de pavimentos, ya que el porcentaje de vehículos pesados no se ve reflejado en el TPDA, y dicho factor es determinante en la cantidad de daño que sufrirá una estructura. Los componentes para estimar el TPDA se desarrollan en las siguientes secciones.

102.03: TIPOS DE CONTEOS

Para realizar conteos en una zona ya definida, es posible utilizar diferentes metodologías de medición que dependen generalmente del tipo de contador. Dentro de estos, se distinguen tres diferentes sistemas de conteo: los contadores neumáticos, los contadores de radar y los contadores manuales. Cada uno de ellos es apropiado para diferentes condiciones específicas de acuerdo con el tipo de vía y la cantidad de vehículos.

De igual manera, la utilización de otros sistemas de conteos para obtener valores de TPD es aceptable y válida, siempre y cuando brinden los resultados deseados.

102.04: CONTADORES MANUALES

Los contadores manuales constituyen el método más simple y básico para realizar conteos, son realizados con instrumentos sencillos que registran la suma de los pulsos indicados por el operador. Este método se puede aplicar en zonas con bajos niveles de tránsito, tanto en volumen como en magnitud de carga, así como en lapsos cortos de tiempo, de varias horas.

En este método, el riesgo de error es considerable, ya que depende completamente de la habilidad de la persona que lleva el control de los conteos, y momentos cortos de saturación de la vía pueden ocasionar una imposibilidad para el contador de registrar los datos, también, puede haber dificultades a la hora de generar los conteos de 25 horas. Es por este motivo que este tipo de conteos no se recomiendan para realizar estimaciones de TPDA.

102.05: CONTADORES DE RADAR

Los contadores de radar permiten un método más apto para realizar conteos en zonas de tránsito considerable, ya que eliminan el factor humano a la hora de realizar el procedimiento. Estos contadores se colocan sobre algún elemento vertical ubicado a un costado de la vía, con el radar direccionado hacia el carril de interés.

Este método posee la ventaja de no necesitar de una superficie de rodadura rígida, pero de igual manera, presenta errores registrando datos bajo ciertas circunstancias, por ejemplo, cuando no hay un espaciamiento significativo entre vehículos. Estos contadores deben ser colocados en zonas donde no se vayan a detener vehículos y donde el tráfico vehicular posea un flujo continuo y libre (ver Figura 102.1).



Figura 102-1. Ejemplo de contador de radar en sitio.
Fuente: (LanammeUCR, 2016)

102.06: CONTADORES DE NEUMÁTICO

Este tipo de contadores representan un método sencillo y efectivo para realizar conteos, se componen de un sistema que adquiere y guarda los datos, y de dos mangueras dispuestas tal y como se muestran en la Figura 102.2, sobre las cuales circulan los vehículos, ejerciendo una presión que activa el contador.

Para su colocación, se deben tomar en cuenta ciertos factores importantes, entre los que destacan que la superficie de rodadura no posea baches o puntos donde la presión de las llantas no se pueda ejercer de manera apropiada, que en el sitio seleccionado no se detengan vehículos, y que el flujo vehicular sea continuo y libre.



Figura 102.2. Ejemplo de contador de mangueras en sitio.
Fuente: (Arias, 2012)

Los valores de Tránsito Promedio Diario deben estar separados por clase y tipo de vehículo, un ejemplo de dicha división se muestra en la Tabla 102.1. Existen varios esquemas de clasificación, como el de La Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos (FHWA), en el cual se muestra una división según la separación entre ejes (SPi) de cada vehículo, la Tabla 102.2 presenta un ejemplo gráfico para interpretar las diferentes clases de vehículos existentes en esta clasificación.

Tabla 102-1

Esquema de distribución vehicular según la Federal Highway Administration (FHWA de Estados Unidos

| Clase | Ejes | SP1 (m) | SP2 (m) | SP3 (m) | SP4 (m) | SP5 (m) | SP6 (m) | SP7 (m) | SP8 (m) | Agregado |
|-------|------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|----------|----------|----------|--------------------|
| 1 | 2 | 0,3 - 1,83 | | | | | | | | Motocicleta |
| 2 | 2 | 1,83 - 3,11 | | | | | | | | Liviano |
| | 3 | 1,83 - 3,11 | 1,83 - 5,5 | | | | | | | |
| 3 | 4 | 1,83 - 3,11 | 1,83 - 5,5 | 0,0 - 1,83 | | | | | | Liviano - Remolque |
| | 2 | 3,11 - 3,96 | | | | | | | | |
| | 3 | 3,11 - 3,96 | 1,83 - 5,5 | | | | | | | |
| 4 | 4 | 3,11 - 3,96 | 1,83 - 5,5 | 0,0 - 1,83 | | | | | | Bus |
| | 2 | 6,1 - 12,2 | | | | | | | | |
| 5 | 3 | 6,1 - 12,2 | 0,0 - 1,83 | | | | | | | Camión |
| | 2 | 3,96 - 6,1 | | | | | | | | |
| 6 | 3 | 1,83 - 7,01 | 0,0 - 1,83 | | | | | | | Camión |
| | 4 | 1,83 - 7,01 | 0,0 - 2,74 | 0,0 - 2,74 | | | | | | |
| | 5 | 1,83 - 5,2 | 0,0 - 1,83 | 0,0 - 1,83 | 0,0 - 1,83 | | | | | |
| 7 | 6 | 1,83 - 5,2 | 0,0 - 1,83 | 0,0 - 1,83 | 0,0 - 1,83 | 0,0 - 1,83 | | | | Camión |
| | 3 | 1,83 - 5,2 | 4,27 - 12,2 | | | | | | | |
| | 4 | 1,83 - 6,71 | 0,0 - 1,83 | 1,83 - 12,2 | | | | | | |
| 8 | 4 | 1,86 - 5,2 | 4,27 - 12,2 | 0,0 - 1,86 | | | | | | Tráiler |
| | 5 | 1,83 - 6,71 | 0,0 - 1,83 | 1,83 - 12,2 | 0,0 - 3,81 | | | | | |
| 9 | 5 | 1,83 - 6,71 | 0,0 - 1,83 | 1,83 - 7,01 | 0,34 - 7,01 | | | | | Tráiler |
| | 6 | 1,83 - 6,71 | 0,0 - 1,83 | 1,83 - 12,2 | 0,0 - 3,4 | 0,0 - 3,4 | | | | |
| 10 | 7 | 1,83 - 6,71 | 0,0 - 1,83 | 0,0 - 12,2 | 0,0 - 3,96 | 0,0 - 3,96 | 0 - 3,96 | | | Tráiler |
| | 5 | 1,83 - 5,2 | 3,4 - 7,6 | 1,83 - 5,5 | 3,4 - 7,6 | | | | | |
| 11 | 6 | 1,83 - 6,71 | 0,0 - 1,83 | 0,3 - 7,6 | 1,83 - 5,5 | 3,4 - 7,6 | | | | Tráiler doble |
| 12 | 7+ | 0 - 12,2 | 0 - 12,2 | 0 - 12,2 | 0 - 12,2 | 0 - 12,2 | 0 - 12,2 | 0 - 12,2 | 0 - 12,2 | Tráiler doble |

Fuente: (Texas Department of Transportation, 2012)

Tabla 102-2

Tipos de vehículo según la Federal Highway Administration (FHWA) de Estados Unidos

| Clase del vehículo | Tipo del vehículo | Ejes del vehículo | Imagen del vehículo |
|--------------------|--|-------------------|--|
| 1 | Motocicletas | 2 ejes |  |
| 2 | Vehículo de turismo | 2 ejes |  |
| 3 | Busetas y camionetas | 2 ejes |  |
| 4 | Autobuses | 2 o 3 ejes |  |
| 5 | Camión de 2 ejes | 2 ejes |  |
| 6 | Camión de 3 ejes | 3 ejes |  |
| 7 | Camión de 4 o más ejes | 4 o más ejes |  |
| 8 | Camión con remolque simple de 3 o 4 ejes | 3 o 4 ejes |  |
| 9 | Camión con remolque simple de 5 ejes | 5 ejes |  |
| 10 | Camión con remolque simple de 6 o más ejes | 6 o más ejes |  |
| 11 | Camión con remolque múltiple de 5 o menos ejes | 5 o menos ejes |  |
| 12 | Camión con remolque múltiple de 6 ejes | 6 ejes |  |

| Clase del vehículo | Tipo del vehículo | Ejes del vehículo | Imagen del vehículo |
|--------------------|--|-------------------|--|
| 13 | Camión con remolque múltiple de 7 o más ejes | 7 o más |  |

Fuente: (Texas Department of Transportation, 2012)

102.07: FACTORES DE EXPANSION HORARIA (FEH)

Los factores de expansión horaria sirven para extrapolar conteos de TPD incompletos a periodos de 24 horas. Para esto se multiplica el volumen horario durante el periodo de conteo, por el FEH para esa hora, y se encuentra el promedio de los productos obtenidos.

Los valores de FEH se calculan con base en los comportamientos típicos identificables de los conteos completos obtenidos, que se separan por grupos, sobre los cuales se calcula un FEH mediante la Ecuación 2.

$$FEH = \frac{\text{Volumen total para un período de 24 horas}}{\text{Volumen para una hora específica}} \quad \text{Ecuación 2}$$

102.08: FACTORES DE EXPANSION DIARIA (FED)

Con los FED es posible estimar el valor del promedio semanal de los datos de TPD obtenidos mediante conteos diarios. Para esto se utilizan los conteos semanales que se hayan realizado, en otras zonas o se tenga de referencia. Poseer conteos de carácter semanal es imperativo para poder obtener los valores de FED, y, por consiguiente, de TPDA.

Los diferentes FED se calculan según la siguiente ecuación:

$$FED_{i'} = \frac{\text{Volumen promedio para un día "i"}}{\text{Volumen total promedio de la semana}} \quad \text{Ecuación 3}$$

102.09: FACTORES DE EXPANSION MENSUAL (FEM)

El volumen de tránsito presenta una variabilidad mensual importante que puede ser cuantificada por medio del FEM. Para obtener estos factores se debe contar con valores medidos en puntos específicos de la red vial, que se obtienen mediante cálculos de conteos anuales completos.

Para calcular el FEM se utiliza la siguiente expresión:

$$FEM_k = \frac{TPD_{mes} \text{ "k" }}{TPDA} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

- TPDmes “k”: Tránsito promedio diario para un mes “k”.
- TPDA: Tránsito promedio diario anual.

Los Factores de Expansión Mensual deben ser medidos en las vías de referencia disponibles para realizar los estudios de tránsito vehicular. En la Tabla 102-3 se muestran valores calculados en la red vial nacional por parte del Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Costa Rica al año 2017 a modo de ejemplo.

Tabla 102-3

Ejemplo de valores de FEM medidos en la red vial nacional

| Mes | Autopista | | | | |
|-----------|---------------|---------------|------------------------|--------------------|------------------|
| | General Cañas | Bernardo Soto | Florencio del Castillo | Próspero Fernández | Braulio Carrillo |
| Enero | 1,02 | 1,19 | 0,96 | 0,91 | 1,03 |
| Febrero | 0,94 | 0,97 | 0,95 | 0,92 | 0,97 |
| Marzo | 1,02 | 1,02 | 1,01 | 0,99 | 1,06 |
| Abril | 0,94 | 0,98 | 0,93 | 0,90 | 1,00 |
| Mayo | 0,99 | 0,98 | 1,01 | 1,02 | 0,99 |
| Junio | 0,96 | 0,93 | 0,98 | 1,00 | 0,94 |
| Julio | 1,05 | 1,06 | 1,04 | 1,00 | 1,03 |
| Agosto | 1,02 | 0,97 | 1,02 | 1,05 | 0,99 |
| Setiembre | 0,97 | 0,92 | 0,99 | 1,01 | 0,97 |
| Octubre | 1,01 | 0,96 | 1,04 | 1,06 | 1,01 |
| Noviembre | 1,03 | 0,98 | 1,03 | 1,08 | 0,99 |
| Diciembre | 1,05 | 1,04 | 1,04 | 1,05 | 1,02 |

Fuente: (MOPT, 2017)

SECCIÓN 103: REQUERIMIENTOS MÍNIMOS DE DISEÑO PARA MATERIALES EN PAVIMENTOS

La estructura del pavimento flexible se compone usualmente de 4 capas, las cuales se encargan de soportar y distribuir los esfuerzos provocados por las cargas de los vehículos. En la Figura 103.1 se muestra un ejemplo de una estructura de pavimento flexible, mientras que en la Figura 103.2 se presenta un ejemplo de un pavimento semirrígido.

Cada una de las capas del pavimento necesita de un estudio y un diseño respectivo que garantice su óptimo funcionamiento dentro de la matriz estructural.

Las diferentes capas estructurales del pavimento deben ser ensayadas y caracterizadas según diversas pruebas internacionales y nacionales estandarizadas, esto, con el fin de verificar el debido cumplimiento de las especificaciones técnicas nacionales impuestas por el ente rector en la materia. Este tema se trata con mayor detalle posteriormente.

Adicionalmente, se debe garantizar que el proyecto cuenta con drenajes adecuados que garanticen la eficiente evacuación de aguas pluviales y las obras complementarias requeridas para satisfacer la demanda hídrica de la zona, esto es una condición indispensable para garantizar un correcto funcionamiento de los materiales seleccionados.

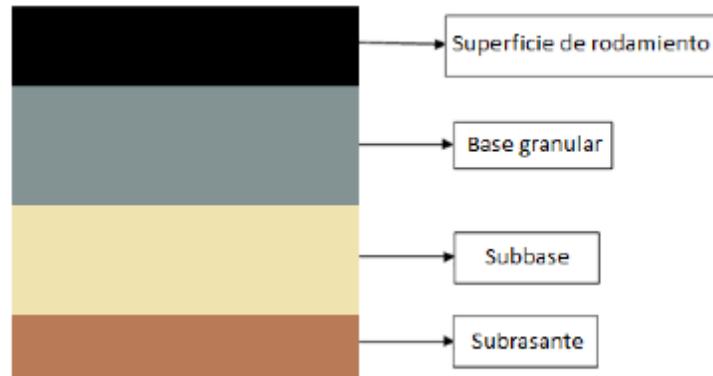


Figura 103-1. Ejemplo de estructura típica de un pavimento flexible

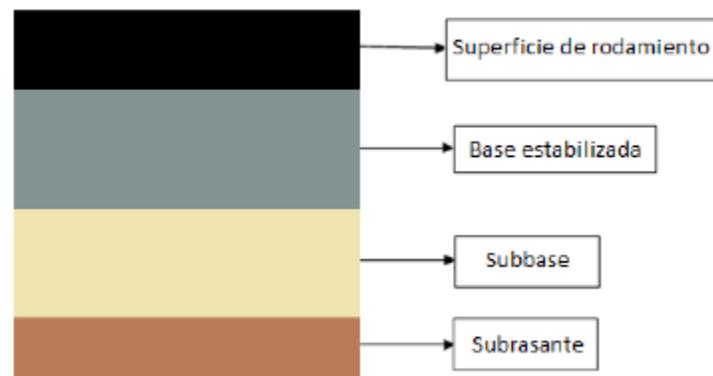


Figura 103-2. Ejemplo de estructura típica de un pavimento semirrígido

A continuación, se muestran algunas consideraciones importantes respecto a los materiales que componen la estructura de un pavimento.

- Superficie de rodamiento:
 - Carpeta de mezcla asfáltica en caliente, según Sección 401 Diseño de mezcla asfáltica por el método Marshall y 405 Suministro y colocación de mezcla asfáltica en caliente, del Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes CR-2010 (MOPT, 2010), o bien, su versión vigente. Con Tamaño Máximo Nominal según espesor colocado.
 - Sello o tratamiento superficial asfáltico según sección 411 Tratamiento superficiales asfálticos, del CR-2010 (MOPT, 2010).
- Base Granular: graduación D o E, CBR > 80%, según Manual CR-2010, Sección 301 Subbases y bases granulares y 703.05 Agregado para capas de subbase y base (MOPT, 2010).
- Base granular estabilizada: Sección 304, Estabilización de agregados con resistencia mínima a compresión inconfiada a los 7 días de 2,8 MPa (MOPT, 2010).
- Subbase granular: graduación B, CBR > 30%, según Manual CR-2010 Sección 301 Subbases y bases granulares y 703.05 Agregado para capas de subbase y base (MOPT, 2010).

- Subrasante existente con CBR > 3% o mejorada si CBR < 3%.

103.01: SUPERFICIE DE RODAMIENTO

De acuerdo con Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes CR-2010 (MOPT, 2010), la superficie de rodamiento es aquella capa superior de la estructura del pavimento, cuyo diseño busca soportar las cargas impuestas, la abrasión y el deslizamiento generado por los vehículos, así como el intemperismo al cual se encuentra expuesta.

La superficie de rodamiento debe poseer una alta capacidad estructural, que soporte cambios constantes de temperatura y clima, así como un carácter impermeable, que evite las infiltraciones de agua, que pueden dañar la estructura inferior del pavimento.

Usualmente las superficies de rodamiento se componen de concreto hidráulico formando una capa rígida, o de una mezcla de agregados y asfalto, que proveen amortiguamiento de las cargas aplicadas gracias a sus propiedades flexibles.

Para ensayar los diferentes agregados a utilizar en la mezcla asfáltica, se plantean una serie de pruebas de laboratorio (ver Tabla 103.1), especificados también en el CR-2010, mediante las cuales es posible caracterizar y detallar los diferentes materiales.

Tabla 103-1

Ensayos para caracterizar agregados de la superficie de rodamiento

| Ensayo | Propiedad ensayada | Resultado del ensayo |
|----------------------------|--|--|
| AASHTO T 27 AASHTO T 11 | Granulometría de los agregados | Distribución granulométrica de los materiales a utilizar |
| ASTM D 4791 | Partículas planas y elongadas | Porcentaje de partículas planas y elongadas |
| ASTM D 5821 | Angulosidad agregado grueso | Porcentaje de partículas que cumplen el criterio de caras fracturadas |
| AASHTO T 304 | Angulosidad Agregado Fino | Contenido de vacíos en el agregado sin compactar (Se relaciona con el contenido de partículas angulares) |
| AASHTO T 176 | Equivalente de arena | Valor equivalente de arena |
| AASHTO T 96 | Abrasión y desgaste | Porcentaje de pérdida de material por abrasión y desgaste |
| AASHTO T 210 | Índice de durabilidad de los agregados | Índice de durabilidad que refleja la resistencia de agregados a producir finos |
| AASHTO T 104 | Sanidad de los agregados | Resistencia de los agregados ante el intemperismo |
| AASHTO T 112 | Partículas friables y arcillosas | Existencia o no de partículas (perjudiciales) suaves y arcillosas en el agregado |

Para realizar el diseño de mezcla asfáltica, existen varias metodologías, siendo la de estabilidad y flujo de Marshall una de las más comunes y aplicables para caminos de bajo volumen. En la Tabla 103.2 se presentan los ensayos propuestos en el CR-2010 para su determinación y normativa interna.

Tabla 103-2

Ensayos de diseño de mezcla asfáltica para determinación y normativa interna

| Diseño de mezcla | Ensayos para determinación y normativa estándar |
|---|--|
| Estabilidad y flujo de Marshall | AASHTO T 245 |
| GBS | AASHTO T 166 |
| Gravedad máxima teórica | AASHTO T 209 |
| Resistencia retenida | AASHTO T 283 |
| Contenido de asfalto de una mezcla asfáltica por ignición | AASHTO T 308 |
| Granulometría de una extracción de asfalto | ASTM D 5444 |

103.02: BASE Y SUBBASE

La capa de base corresponde a la capa principal de transmisión de cargas en los carriles de tránsito, y se encuentra constituida por materiales debidamente compactados, esta capa también funciona como apoyo y superficie de trabajo para la colocación de la superficie de ruedo y la calidad de la base influye directamente en la regularidad y vida útil de la superficie de ruedo.

La capa de subbase es la capa secundaria de distribución de carga, y se encuentra bajo la capa de base, suele componerse por materiales de menor calidad y durabilidad que aquellos utilizados para la base (Keller & Sherar, 2008), tiene gran aporte para el drenaje pluvial del suelo y funciona como superficie de trabajo para la colocación del resto de capas del pavimento.

Las capas de base y subbase para pavimentos flexibles se pueden componer de distintos materiales, entre ellos se pueden mencionar la piedra triturada con graduaciones definidas, macadam compactado en seco o unificado con agua y grava natural (Cook, Petts, & Rolt, 2013).

Para ensayar los materiales granulares a utilizar en la base y la subbase, en el Manual CR-2010 (MOPT, 2010) se plantean una serie de pruebas de laboratorio, mediante las cuales se caracterizan y detallan cada tipo de material, que se muestran en la Tabla 103.3.

Tabla 103-3
Ensayos para materiales granulares

| Ensayo | Propiedad ensayada | Resultado del ensayo |
|-----------------------------|---|---|
| AASHTO T 89 AASHTO T 90 | Límites de Atterberg | Valores de límites líquido y plástico del material ensayado |
| AASHTO T 88 | Granulometría de un suelo | Curva granulométrica del suelo ensayado |
| AASHTO T 11 AASHTO T 27 | Granulometría de los agregados | Distribución granulométrica de los materiales a utilizar |
| AASHTO T 99 AASHTO T 180 | Relación humedad-densidad, ensayo Proctor | Relación entre la densidad seca máxima y la humedad del suelo, utilizadas para determinar la compactación óptima en sitio |
| AASHTO T 193 | Capacidad relativa de soporte (CBR) | Valor de CBR del suelo ensayado y capas granulares |
| ASTM D 5821 | Angulosidad agregado grueso | Porcentaje de partículas que cumplen el criterio de caras fracturadas |
| AASHTO T 210 | Índice de durabilidad de los agregados | Índice de durabilidad que refleja la resistencia de agregados a producir finos |
| AASHTO T 96 | Abrasión y desgaste | Porcentaje de pérdida de material por abrasión y desgaste |

103.03: SUBRASANTE

Según Keller & Sherar (2008), la subrasante corresponde al suelo existente de donde se erige la estructura de pavimento, por lo tanto, es la capa inferior de la estructura de pavimento. Es de suma importancia que la subrasante posea una capacidad estructural suficiente para el correcto funcionamiento de las demás capas.

Debido a que la subrasante se compone de un material ya existente en el sitio de construcción, esta se separa generalmente en dos grandes grupos, según el valor obtenido en la prueba de CBR (AASHTO T-193), mediante la cual se decide la capacidad funcional de dicha capa como parte de la estructura del pavimento.

Las dos clasificaciones posibles para la subrasante corresponden a las siguientes:

- CBR (AASHTO T-193) > 3%, subrasante aceptable (deseable > 5%)
- CBR (AASHTO T-193) < 3%, subrasante inaceptable, realizar proceso de estabilización o sustitución.

Cabe recalcar que para hacer uso de la presente guía es de suma importancia que se caracterice adecuadamente el CBR (AASHTO T-193) de la subrasante a lo largo del sitio donde se construirá la estructura de pavimento, por lo tanto, se recomienda que como mínimo se sigan las siguientes recomendaciones para analizar preliminarmente el camino y realizar el diseño de este (ver Tabla 103.4).

Tabla 103-4

Cantidad de ensayos requeridos para caracterizar la subrasante

| Etapa del proyecto | Ensayo | Norma | Frecuencia mínima por kilómetro | Cantidad mínima por proyecto |
|--|---|----------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| Análisis preliminar del camino | Calicatas para sondeo de espesores a al menos 2 metros de profundidad | - | 2 | 3 |
| | Cono de penetración dinámico (DCP)/CBR en sitio | ASTM D-6951 | 10 | 1 cada 100 metros |
| | Porcentaje de humedad natural | - | 3 | 3 |
| Diseño de pavimento por proyecto o sección homogénea | CBR de laboratorio para diseño | AASHTO T-193 | 3 | 2 |
| | Clasificación de suelos (SUCS y AASHTO) | ASTM D2487 AAHTO-M-145 | 3 | 2 |
| | Límites de Atterberg | AASHTO T 89 AASHTO T 90 | 3 | 2 |
| | Indicación de existencia de nivel de freático | - | 3 | 2 |
| | Porcentaje de humedad natural | - | 3 | 2 |

Como complemento al análisis preliminar del proyecto se recomienda utilizar la metodología de diferencias acumuladas con los valores del DCP para identificar posibles tramos homogéneos, según el procedimiento descrito en el apéndice J de la guía de diseño de la AASHTO de 1993 y así segmentar el proyecto en posibles secciones que posean condiciones similares.

Después de analizar el camino de forma preliminar y definir si existe más de una sección homogénea se recomienda realizar de la misma forma una caracterización acorde a los ensayos y frecuencia de la Tabla 103.4.

Para definir el CBR (AASHTO T-193) característico del camino (diseño) se recomienda utilizar el percentil 16 de las mediciones consideradas, esto permite garantizar que el 84% de las medidas poseen un CBR mayor al valor de diseño seleccionado.

Es muy importante aclarar que en caso de que se detecte un material o suelo muy deficiente como arcillas expansivas, suelos colapsables o algún estrato que ponga en riesgo la integridad de la estructura (SUCS-AASHTO), el mismo deberá ser removido en su totalidad. De igual forma si algún ensayo brinda un valor de CBR menor al 3%, deberá realizarse una sustitución o mejoramiento.

En caso de contar con una subrasante con un CBR (AASHTO T-193) ubicado entre los valores de 2% y 3%, se recomienda que el espesor mínimo de sustitución sea de al menos 30 cm, siguiendo los procesos de colocación y compactación recomendados en el Manual CR-2010 y que el material de sustitución posea un CBR mínimo de 5 %, para garantizar un

adecuado comportamiento estructural. **Realizando este mejoramiento se puede considerar un CBR de 4% como subrasante de diseño para esta guía.**

Para realizar una caracterización de los materiales de subrasante, se cuenta con los diferentes ensayos mostrados en la Tabla 103.5, dichos ensayos son aplicables indiferentemente del valor de CBR del material.

Tabla 103-5

Ensayos para suelos que conforman subrasantes

| Ensayo | Propiedad ensayada | Resultado del ensayo |
|-----------------------------|---|---|
| AASHTO T 88 | Granulometría del suelo | Curva granulométrica del material ensayado |
| AASHTO T 89 AASHTO T 90 | Límites de Atterberg | Valor de Límite plástico, límite líquido y límite de contracción del material ensayado |
| AASHTO T 176 | Equivalente de arena | Indicativo del valor de plasticidad del suelo |
| ASTM D 2216 | Humedad natural | Condición de humedad natural del material ensayado |
| AASHTO T 193 | Ensayo CBR | Valor de soporte o resistencia del suelo según determinadas densidades |
| AASHTO T 99 AASHTO T 180 | Relación humedad-densidad, ensayo Proctor | Relación entre la densidad seca máxima y la humedad del suelo, utilizadas para determinar la compactación óptima en sitio |

Diseño
Estructural

Capítulo 2

CAPÍTULO 2: DISEÑO ESTRUCTURAL

SECCIÓN 201: GENERALIDADES

Para los diseños realizados se analizaron propuestas preliminares por medio de la metodología de la AASHTO de 1993. Sin embargo, el principio de diseños es la utilización de criterios mecanístico empíricos para la revisión y validación de estructuras de pavimentos. Por lo tanto, desde el punto de vista de mecánica de materiales se utilizaron conceptos como: módulo dinámico, módulo resiliente de materiales granulares, temperaturas del país, velocidades de operación y modelos para la predicción de desempeño.

En el anexo 1 del informe de investigación LM-PI-UMP-103-R1, se presentan en detalle los modelos constitutivos de base y subbase utilizados para la convergencia de módulos resilientes de estos materiales. Se utilizaron 3 modelos característicos por material para la convergencia de módulos (con un máximo de 5 iteraciones por diseño).

En total se realizaron 375 modelaciones utilizando la metodología de multicapa elástica para la convergencia de módulos y 75 modelaciones adicionales para obtener las respuestas críticas para cada estructura y con esto estimar la cantidad de ESALs necesarios para producir un ahuellamiento máximo de 16 mm, un porcentaje de agrietamiento del 25 % del carril y una longitud máxima de grietas longitudinales de 380 metros por kilómetro. Los umbrales utilizados para validar estos diseños son congruentes con los umbrales recomendados en la “Propuesta Guía Para El Diseño Estructural Mecanístico Empírico De Pavimentos” (Arias, 2017) y Tomo I: Guía Mecanística Empírica para el Diseño de Pavimentos con sus respectivos niveles de confiabilidad. Sin embargo, los resultados acá expuestos podrían ser revisados conforme se actualicen y calibren nuevos modelos para Costa Rica.

SECCIÓN 202: VARIABLES DE DISEÑO

202.01: TRÁNSITO PROMEDIO DIARIO

Para la Guía de Diseño de Bajo Volumen se establecen cinco clasificaciones de tráfico distintas. Los distintos rangos de TPD se definieron con base en el análisis de las mediciones de tráfico realizadas por la Unidad de Gestión Municipal (UGM) del LanammeUCR al año 2017. En total se analizaron 291 datos y se seleccionaron rangos de tráfico correspondientes a los percentiles 15, 25, 35, 50 y 75 del total de las mediciones realizadas. La categorización del TPD se toma de la Sección 9.2.2. del informe “Propuesta para una guía de diseño de bajo volumen para pavimentos flexibles y semirrígidos”, Informe LM-PI-GM-INF-05-16 (Arias, 2017), donde el proceso es descrito con más detalle. A continuación, se muestra cada uno de los rangos de tráfico de la guía de diseño:

- T500: Menor a 500 vehículos por día (vpd).
- T800: Entre 501 y 800 vpd.
- T1200: Entre 801 y 1200 vpd.
- T2000: Entre 1201 y 2000 vpd.
- T3500: Entre 2001 y 3500 vpd.

Cabe resaltar que, si por una carretera circulan más de 3500 vehículos por día, por el momento no se podrá utilizar esta guía para el diseño simplificado de pavimentos, es decir, se deberá realizar un proceso convencional de diseño.

Nota: Para la verificación mecanístico-empírica de los diseños propuestos se utiliza para las modelaciones el valor máximo de vehículos por día de cada rango. Por ejemplo, para analizar la resistencia de una estructura por la cual pasa un nivel T_{500} de vehículos por día, se considera que la cantidad de vehículos por día es de 500 para ese rango. De igual forma, si por la estructura pasa a un nivel T_{800} de vehículos por día, se utiliza una cantidad de 800 vehículos por día para las modelaciones.

202.02: CBR DE LA SUBRASANTE

Los rangos de CBR para clasificar los suelos se definieron con base en datos recolectados in situ por la Unidad de Gestión Municipal del LanammeUCR. En este caso, se realizó un análisis estadístico y se seleccionaron los percentiles representativos para categorizar los valores de CBR. La definición de dichos rangos se detalla en la Sección 9.3. del informe “Propuesta para una guía de diseño de bajo volumen para pavimentos flexibles y semirrígidos” (Arias, 2017). A continuación, se muestra porcentualmente la magnitud de los datos de CBR medidos:

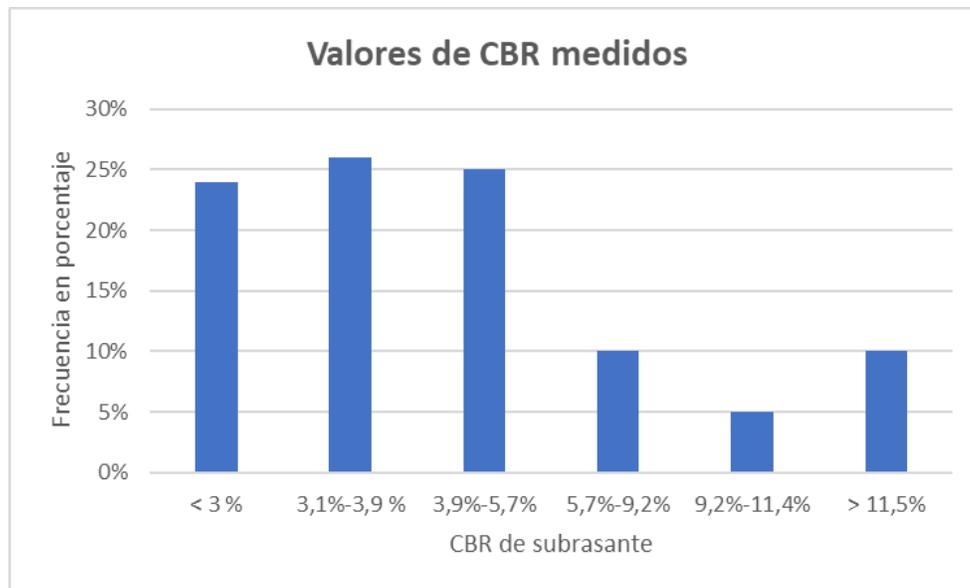


Figura 202-1. Distribución porcentual del CBR de subrasante

Es importante notar que una gran cantidad de los datos medidos presentan un CBR inferior a 3,0%. Esto se tomó en consideración al elaborar la guía, ya que, a pesar de que el objetivo de esta guía es presentar una metodología de diseño para carreteras con bajas exigencias de tráfico, se considera que magnitudes tan bajas de CBR no son aptas para la construcción de una estructura de pavimento. Por ende, los diseños presentados en esta guía no serán aplicables sobre suelos con un CBR inferior al 3%. Sin embargo, si se realiza una sustitución o mejoramiento de la subrasante, la presente guía podría ser utilizada. Tomando en cuenta lo anterior, las cinco categorías de CBR definidas para el diseño son las siguientes:

- CBR3%: Entre 3% y 3,99%
- CBR4%: Entre 4% y 5,99%
- CBR6%: Entre 6% y 8,99%
- CBR9%: Entre 9% y 10,99%
- CBR11%: Mayor al 11%

Nota: Para la verificación mecanístico-empírica de los diseños propuestos se utiliza para las modelaciones el valor mínimo de CBR de cada rango. Por ejemplo, para analizar la resistencia de una estructura colocada sobre un suelo con clasificación CBR3% se utiliza en la modelación un CBR del 3%. Si la estructura se coloca sobre un suelo con clasificación CBR4% se utiliza un CBR de 4%.

202.03: PORCENTAJE DE VEHÍCULOS PESADOS

Los porcentajes de vehículos pesados se determinaron a partir de los mismos conteos con los cuales se obtuvieron los valores y categorías de TPD. En total se analizaron 291 datos de conteos realizados por la UGM del LanammeUCR y se definieron siete categorías asociadas a percentiles específicos del total de las mediciones realizadas. En la Sección 9.2.4. del informe “Propuesta para una guía de diseño de bajo volumen para pavimentos flexibles y semirrígidos” elaborado por Arias (2017) se explica detalladamente la selección de las distintas categorías para el porcentaje de vehículos pesados, mismas que se muestran a continuación:

- P3%: Menor al 3,0%.
- P4%: Entre 3,01% y 4,0%.
- P5%: Entre 4,01% y 5,0%.
- P7%: Entre 5,01% y 7,0%.
- P8%: Entre 7,01% y 8,5%.
- P14%: Entre 8,51% y 14,0%.
- P15%: Entre 14,01% y 15,0%.

Nótese que, si por una carretera circula un porcentaje de vehículos pesados superior al 15% del tráfico total, no se podrá utilizar esta guía para el diseño simplificado de pavimentos.

Nota: Para la verificación mecanístico-empírica de los diseños propuestos se utiliza para las modelaciones el valor máximo de porcentaje de pesados de cada rango. Por ejemplo, para analizar la resistencia de una estructura por la cual pasa un tráfico con un nivel de pesados P3%, se considera que el porcentaje de pesados es 3 %. De igual forma, si por la estructura pasa un tráfico con un nivel de pesados P4% se utiliza un porcentaje de 4 % para las modelaciones.

202.04: EJES EQUIVALENTES DE DISEÑO (ESALS)

Para cada una de las diferentes combinaciones de TPD (T_i), porcentaje de vehículos pesados (P_i) y periodo de diseño (AN_i), se calcularon los ejes equivalentes de carga (ESALs). Este proceso se presenta a detalle en las Secciones 9.2.5 y 9.2.6 del informe “Propuesta para una guía de diseño de bajo volumen para pavimentos flexibles y semirrígidos” (Arias, 2017). Los resultados se muestran resumidos en las Tablas 202-1 a la 202-4; donde cada combinación $AN_i T_i P_i$ genera una cantidad específica de ESALs a

cumplir. Los períodos de diseño enfocados en 6 a 12 años contemplan rangos de diseño para caminos de bajo de volumen, acordes a los rangos de ESALs estimados, sin embargo, se recomienda en la medida de lo posible, mantener períodos de diseño iguales o superiores a los 8 años, considerando la importancia y clasificación de la ruta. Cabe resaltar que las celdas con valores que superan 1,5 millones de ESALs se marcan en rojo, debido a que el alcance de la guía de diseño simplificada se ha definido únicamente para vías con volumen de tráficos menores a este valor.

Tabla 202-1

ESALs para el periodo de diseño de 6 años de acuerdo con las diferentes combinaciones de TPD y Pesados

| Período de diseño = 6 Años | | | | | | | Período de diseño = 6 Años | | | | | | |
|----------------------------|--------------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|----------------------------|--------------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| Pesados | Tránsito promedio diario | | | | | | Pesados | Tránsito promedio diario | | | | | |
| | T ₅₀₀ | T ₈₀₀ | T ₁₂₀₀ | T ₂₀₀₀ | T ₃₅₀₀ | T _{>3500} | | T ₅₀₀ | T ₈₀₀ | T ₁₂₀₀ | T ₂₀₀₀ | T ₃₅₀₀ | T _{>3500} |
| P _{3%} | AN1T1P1 | AN1T2P1 | AN1T3P1 | AN1T4P1 | AN1T5P1 | AN1T6P1 | P _{3%} | 61587 | 98539 | 147809 | 246348 | 431109 | 615870 |
| P _{4%} | AN1T1P2 | AN1T2P2 | AN1T3P2 | AN1T4P2 | AN1T5P2 | AN1T6P2 | P _{4%} | 82116 | 131386 | 197078 | 328464 | 574812 | 821160 |
| P _{5%} | AN1T1P3 | AN1T2P3 | AN1T3P3 | AN1T4P3 | AN1T5P3 | AN1T6P3 | P _{5%} | 102645 | 164232 | 246348 | 410580 | 718515 | 1026449 |
| P _{7%} | AN1T1P4 | AN1T2P4 | AN1T3P4 | AN1T4P4 | AN1T5P4 | AN1T6P4 | P _{7%} | 143703 | 229925 | 344887 | 574812 | 1005920 | 1437029 |
| P _{8,5%} | AN1T1P5 | AN1T2P5 | AN1T3P5 | AN1T4P5 | AN1T5P5 | AN1T6P5 | P _{8,5%} | 174496 | 279194 | 418791 | 697986 | 1221475 | 1744964 |
| P _{14%} | AN1T1P6 | AN1T2P6 | AN1T3P6 | AN1T4P6 | AN1T5P6 | AN1T6P6 | P _{14%} | 287406 | 459849 | 689774 | 1149623 | 2011841 | 2874058 |
| P _{15%} | AN1T1P7 | AN1T2P7 | AN1T3P7 | AN1T4P7 | AN1T5P7 | AN1T6P7 | P _{15%} | 307935 | 492696 | 739044 | 1231739 | 2155544 | 3079348 |

Tabla 202-2

ESALs para el periodo de diseño de 8 años de acuerdo con las diferentes combinaciones de TPD y Pesados

| Período de diseño = 8 Años | | | | | | | Período de diseño = 8 Años | | | | | | |
|----------------------------|--------------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|----------------------------|--------------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| Pesados | Tránsito promedio diario | | | | | | Pesados | Tránsito promedio diario | | | | | |
| | T ₅₀₀ | T ₈₀₀ | T ₁₂₀₀ | T ₂₀₀₀ | T ₃₅₀₀ | T _{>3500} | | T ₅₀₀ | T ₈₀₀ | T ₁₂₀₀ | T ₂₀₀₀ | T ₃₅₀₀ | T _{>3500} |
| P _{3%} | AN2T1P1 | AN2T2P1 | AN2T3P1 | AN2T4P1 | AN2T5P1 | AN2T6P1 | P _{3%} | 85554 | 136886 | 205329 | 342215 | 598877 | 855538 |
| P _{4%} | AN2T1P2 | AN2T2P2 | AN2T3P2 | AN2T4P2 | AN2T5P2 | AN2T6P2 | P _{4%} | 114072 | 182515 | 273772 | 456287 | 798502 | 1140717 |
| P _{5%} | AN2T1P3 | AN2T2P3 | AN2T3P3 | AN2T4P3 | AN2T5P3 | AN2T6P3 | P _{5%} | 142590 | 228143 | 342215 | 570359 | 998128 | 1425897 |
| P _{7%} | AN2T1P4 | AN2T2P4 | AN2T3P4 | AN2T4P4 | AN2T5P4 | AN2T6P4 | P _{7%} | 199626 | 319401 | 479101 | 798502 | 1397379 | 1996255 |
| P _{8,5%} | AN2T1P5 | AN2T2P5 | AN2T3P5 | AN2T4P5 | AN2T5P5 | AN2T6P5 | P _{8,5%} | 242402 | 387844 | 581766 | 969610 | 1696817 | 2424024 |
| P _{14%} | AN2T1P6 | AN2T2P6 | AN2T3P6 | AN2T4P6 | AN2T5P6 | AN2T6P6 | P _{14%} | 399251 | 638802 | 958203 | 1597004 | 2794757 | 3992511 |
| P _{15%} | AN2T1P7 | AN2T2P7 | AN2T3P7 | AN2T4P7 | AN2T5P7 | AN2T6P7 | P _{15%} | 427769 | 684430 | 1026646 | 1711076 | 2994383 | 4277690 |

Tabla 202-3

ESALs para el periodo de diseño de 10 años de acuerdo con las diferentes combinaciones de TPD y Pesados

| Período de diseño = 10 Años | | | | | | | Período de diseño = 10 Años | | | | | | |
|-----------------------------|--------------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------------|--------------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| Pesados | Tránsito promedio diario | | | | | | Pesados | Tránsito promedio diario | | | | | |
| | T ₅₀₀ | T ₈₀₀ | T ₁₂₀₀ | T ₂₀₀₀ | T ₃₅₀₀ | T _{>3500} | | T ₅₀₀ | T ₈₀₀ | T ₁₂₀₀ | T ₂₀₀₀ | T ₃₅₀₀ | T _{>3500} |
| P _{3%} | AN3T1P1 | AN3T2P1 | AN3T3P1 | AN3T4P1 | AN3T5P1 | AN3T6P1 | P _{3%} | 111476 | 178362 | 267543 | 445905 | 780334 | 1114763 |
| P _{4%} | AN3T1P2 | AN3T2P2 | AN3T3P2 | AN3T4P2 | AN3T5P2 | AN3T6P2 | P _{4%} | 148635 | 237816 | 356724 | 594540 | 1040446 | 1486351 |
| P _{5%} | AN3T1P3 | AN3T2P3 | AN3T3P3 | AN3T4P3 | AN3T5P3 | AN3T6P3 | P _{5%} | 185794 | 297270 | 445905 | 743176 | 1300557 | 1857939 |
| P _{7%} | AN3T1P4 | AN3T2P4 | AN3T3P4 | AN3T4P4 | AN3T5P4 | AN3T6P4 | P _{7%} | 260111 | 416178 | 624267 | 1040446 | 1820780 | 2601114 |
| P _{8,5%} | AN3T1P5 | AN3T2P5 | AN3T3P5 | AN3T4P5 | AN3T5P5 | AN3T6P5 | P _{8,5%} | 315850 | 505359 | 758039 | 1263398 | 2210947 | 3158496 |

| Período de diseño = 10 Años | | | | | | |
|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Tránsito promedio diario | | | | | | |
| P _{14%} | AN3T1P 6 | AN3T2P 6 | AN3T3P 6 | AN3T4P 6 | AN3T5P 6 | AN3T6P 6 |
| P _{15%} | AN3T1P 7 | AN3T2P 7 | AN3T3P 7 | AN3T4P 7 | AN3T5P 7 | AN3T6P 7 |

| Período de diseño = 10 Años | | | | | | |
|-----------------------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Tránsito promedio diario | | | | | | |
| P _{14%} | 52022 3 | 83235 7 | 124853 5 | 208089 1 | 364156 0 | 520222 9 |
| P _{15%} | 55738 2 | 89181 1 | 133771 6 | 222952 7 | 390167 1 | 557381 6 |

Tabla 202-4

ESALs para el periodo de diseño de 12 años de acuerdo con las diferentes combinaciones de TPD y Pesados

| Período de diseño = 12 Años | | | | | | |
|-----------------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| Tránsito promedio diario | | | | | | |
| Pesados | T ₅₀₀ | T ₈₀₀ | T ₁₂₀₀ | T ₂₀₀₀ | T ₃₅₀₀ | T _{>3500} |
| P _{3%} | AN4T1P 1 | AN4T2P 1 | AN4T3P 1 | AN4T4P 1 | AN4T5P 1 | AN4T6P 1 |
| P _{4%} | AN4T1P 2 | AN4T2P 2 | AN4T3P 2 | AN4T4P 2 | AN4T5P 2 | AN4T6P 2 |
| P _{5%} | AN4T1P 3 | AN4T2P 3 | AN4T3P 3 | AN4T4P 3 | AN4T5P 3 | AN4T6P 3 |
| P _{7%} | AN4T1P 4 | AN4T2P 4 | AN4T3P 4 | AN4T4P 4 | AN4T5P 4 | AN4T6P 4 |
| P _{8,5%} | AN4T1P 5 | AN4T2P 5 | AN4T3P 5 | AN4T4P 5 | AN4T5P 5 | AN4T6P 5 |
| P _{14%} | AN4T1P 6 | AN4T2P 6 | AN4T3P 6 | AN4T4P 6 | AN4T5P 6 | AN4T6P 6 |
| P _{15%} | AN4T1P 7 | AN4T2P 7 | AN4T3P 7 | AN4T4P 7 | AN4T5P 7 | AN4T6P 7 |

| Período de diseño = 12 Años | | | | | | |
|-----------------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| Tránsito promedio diario | | | | | | |
| Pesados | T ₅₀₀ | T ₈₀₀ | T ₁₂₀₀ | T ₂₀₀₀ | T ₃₅₀₀ | T _{>3500} |
| P _{3%} | 13951 4 | 223223 | 334834 | 558057 | 976599 | 139514 1 |
| P _{4%} | 18601 9 | 297630 | 446445 | 744075 | 130213 2 | 186018 8 |
| P _{5%} | 23252 4 | 372038 | 558057 | 930094 | 162766 5 | 232523 5 |
| P _{7%} | 32553 3 | 520853 | 781279 | 130213 2 | 227873 1 | 325533 0 |
| P _{8,5%} | 39529 0 | 632464 | 948696 | 158116 0 | 276703 0 | 395290 0 |
| P _{14%} | 65106 6 | 104170 5 | 156255 8 | 260426 4 | 455746 2 | 651065 9 |
| P _{15%} | 69757 1 | 111611 3 | 167417 0 | 279028 3 | 488299 5 | 697570 6 |

202.05: ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO

Para poder definir las estructuras preliminares por revisar se realizaron 364 diseños por la metodología de la AASHTO 1993, contemplando estructuras con mezcla asfáltica en caliente, una o dos capas granulares y contemplando opciones con tratamiento superficial. Posterior a esto se definieron estructuras típicas por revisar, mediante criterios mecánico empíricos. Esto permitió definir una familia de 15 estructuras preliminares, a las cuales se les realizó una verificación completa de desempeño. En las siguientes imágenes pueden observarse los esquemas y configuración de las estructuras seleccionadas.

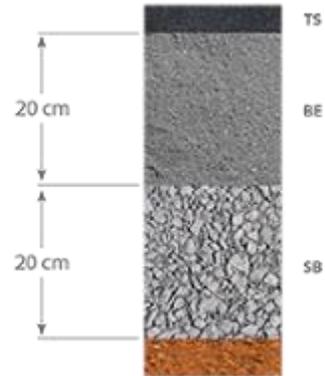
ETS-1

- Tratamiento Superficial
- Base granular



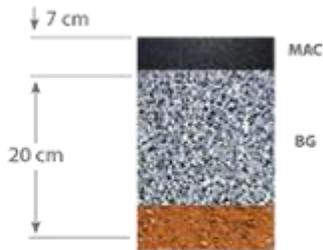
ETS-2

- Tratamiento superficial
- Base estabilizada con cemento
- Subbase granular



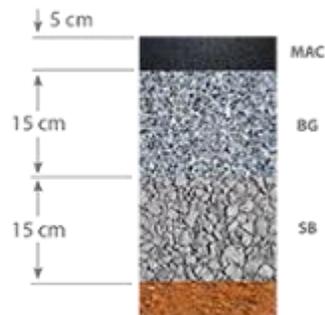
EBG-1

- Mezcla asfáltica en caliente
- Base granular



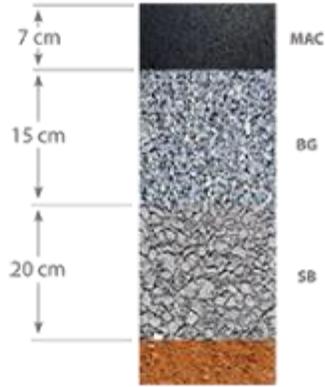
EBG-2

- Mezcla asfáltica en caliente
- Base granular
- Subbase granular



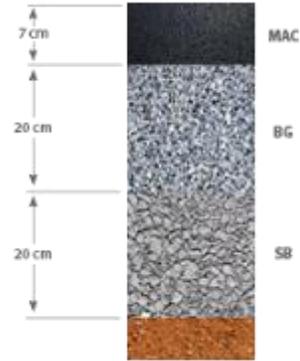
EBG-3

- Mezcla asfáltica en caliente
- Base granular
- Subbase granular



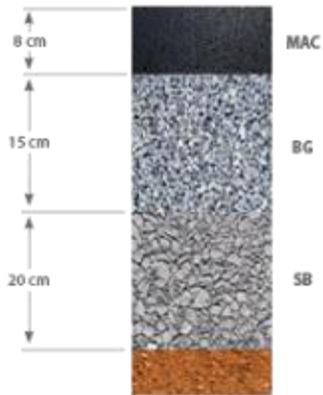
EBG-4

- Mezcla asfáltica en caliente
- Base granular
- Subbase granular



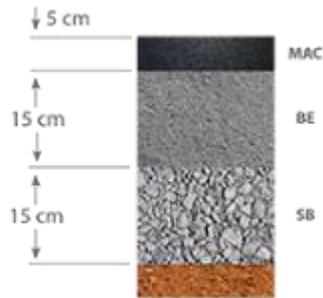
EBG-5

- Mezcla asfáltica en caliente
- Base granular
- Subbase granular



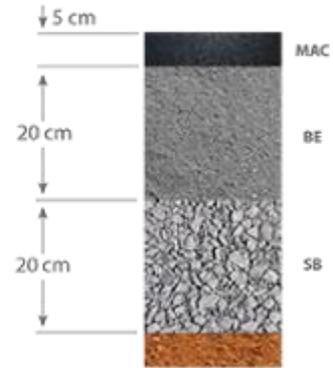
EBE-1

- Mezcla asfáltica en caliente
- Base estabilizada con cemento
- Subbase granular



EBE-2

- Tratamiento superficial triple
- Base estabilizada con cemento
- Subbase granular



Selección de la Estructura

Capítulo **3**

CAPÍTULO 3: SELECCIÓN DE LA ESTRUCTURA

SECCIÓN 301: GENERALIDADES

Con base en los resultados obtenidos de los análisis mecanístico-empíricos efectuados para cada una de las estructuras analizadas, se seleccionaron un total de nueve estructuras finales para la guía simplificada de diseño de pavimentos para vías de bajo volumen. Se tomó en cuenta que las estructuras presenten un desempeño óptimo para resistir el daño por fatiga y por deformación permanente, considerando: condiciones dadas de periodo de diseño, resistencia del suelo, cantidad de vehículos diarios (TPD) y porcentaje de vehículos pesados.

SECCIÓN 302: CATÁLOGO DE ESTRUCTURAS

Las estructuras finales se muestran en la Tabla 302-1, dentro de las estructuras seleccionadas se incluyen opciones con tratamiento superficial, carpeta asfáltica y base granular, y carpeta asfáltica y base estabilizada con cemento. Es importante mencionar que, para simplificar el reconocimiento de las distintas estructuras finales propuestas en la guía, se decidió acoger una nomenclatura para distinguir de forma sencilla, si la estructura lleva un tratamiento superficial (ETS), si la estructura presenta base granular (EBG) o si la estructura posee una base estabilizada (EBE).

Tabla 302-1

Resumen de estructuras seleccionadas para la guía de diseño de bajo volumen

| Nomenclatura | Espesor de las capas (cm) | | | | Tratamiento Superficial |
|--------------|---------------------------|---------------|-------------------|---------|-------------------------|
| | Mezclas Asfáltica | Base Granular | Base Estabilizada | Subbase | |
| ETS-1 | - | 20 | - | - | SÍ |
| ETS-2 | - | - | 20 | 20 | SÍ |
| EBG-1 | 7 | 20 | - | - | NO |
| EBG-2 | 5 | 15 | - | 15 | NO |
| EBG-3 | 7 | 15 | - | 20 | NO |
| EBG-4 | 7 | 20 | - | 20 | NO |
| EBG-5 | 8 | 15 | - | 20 | NO |
| EBE-1 | 5 | - | 15 | 15 | NO |
| EBE-2 | 5 | - | 20 | 20 | NO |

Tal como se ha mencionado, el proceso de diseño con esta guía involucra cuatro variables: periodo de diseño, CBR del suelo, tráfico promedio diario (TPD) y porcentaje de vehículos pesados. Dependiendo del valor de dichas variables, se pueden seleccionar una o varias estructuras que cumplen con los parámetros de desempeño por fatiga y deformación permanente, es decir, para cada combinación de variables se tiene una o más estructuras asociadas.

Debido a la naturaleza de las estructuras analizadas para algunas combinaciones de periodo de diseño (AN_i), TPD (T_i), porcentaje de pesados (P_i) y CBR de la subrasante, puede darse el caso que cumpla más de una estructura, es por este motivo que la elección

final del paquete estructural se debe ajustar a un análisis económico, disponibilidad de materiales, disponibilidad de equipo y maquinaria adecuados, conocimiento de la práctica constructiva o un plan de gestión de pavimentos.

Es importante mencionar que los tratamientos superficiales pueden ser tipo 2 o tipo 3. Lo anterior, depende del periodo de diseño seleccionado, de tal manera que, si se selecciona un periodo de diseño de 6 u 8 años se podría utilizar un tratamiento superficial tipo 2. Por otro lado, si el periodo de diseño es de 10 años, se recomienda utilizar un tratamiento superficial tipo 3. En este tipo de estructuras es posible reemplazar el tratamiento superficial por algún otro sello, técnicamente viable y que brinde el mismo grado de protección, impermeabilización y calidad en la superficie de ruedo durable el período de diseño.

En las siguientes tablas de asignación de paquetes estructurales, se muestran las estructuras óptimas a elegir para cada combinación de variables:

Tabla 302-2

Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 6 años y módulo resiliente de 4500 psi (CBR = 3%)

| Período de diseño = 6 Años_MR 4500 psi | | | | | | |
|--|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--|
| Tránsito promedio diario | | | | | | |
| Pesados | T ₅₀₀ | T ₈₀₀ | T ₁₂₀₀ | T ₂₀₀₀ | T ₃₅₀₀ | |
| P _{3%} | EBG-1, EBG-2 | EBG-1, EBG-2 | EBG-1, EBG-3 | EBG-4, EBE-2 | EBE-2 | |
| P _{4%} | EBG-1, EBG-2 | EBG-1, EBG-2 | EBG-1, EBG-3 | EBE-2 | EBE-2 | |
| P _{5%} | EBG-1, EBG-2 | EBG-1, EBG-3 | EBG-4, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | |
| P _{7%} | EBG-1, EBG-3 | EBE-2, EBG-3 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | |
| P _{8,5%} | EBG-1, EBG-3 | EBG-5, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | |
| P _{14%} | EBG-5, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | |
| P _{15%} | EBG-5, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | |

Tabla 302-3

Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 6 años y módulo resiliente de 6000 psi (CBR = 4%)

| Período de diseño = 6 Años_MR 6000 psi | | | | | | |
|--|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| Tránsito promedio diario | | | | | | |
| Pesados | T ₅₀₀ | T ₈₀₀ | T ₁₂₀₀ | T ₂₀₀₀ | T ₃₅₀₀ | T _{>3500} |
| P _{3%} | EBG-1, EBG-2 | EBG-1, EBG-2 | EBG-2 | EBE-2, EBG-3 | EBE-2 | EBE-2 |
| P _{4%} | EBG-1, EBG-2 | EBG-1, EBG-2 | EBG-1, EBG-3 | EBG-5, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 |
| P _{5%} | EBG-1, EBG-2 | EBG-1, EBG-3 | EBG-3, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 |
| P _{7%} | EBG-1, EBG-2 | EBE-2, EBG-3 | EBG-5, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 |
| P _{8,5%} | EBG-1, EBG-3 | EBG-4, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | |
| P _{14%} | EBG-5, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | |
| P _{15%} | EBG-5, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | |

Tabla 302-4

Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 6 años y módulo resiliente de 9000 psi (CBR = 6%)

| Período de diseño = 6 Años_MR 9000 psi | | | | | | |
|--|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| Tránsito promedio diario | | | | | | |
| Pesados | T ₅₀₀ | T ₈₀₀ | T ₁₂₀₀ | T ₂₀₀₀ | T ₃₅₀₀ | T _{>3500} |
| P _{3%} | ETS-1 | ETS-1 | ETS-1 | ETS-1, EBG-3 | EBE-2 | EBE-2 |
| P _{4%} | ETS-1 | ETS-1 | ETS-1 | EBG-5, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 |
| P _{5%} | ETS-1 | ETS-1 | ETS-1, EBG-3 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 |
| P _{7%} | ETS-1 | ETS-1, EBG-3 | EBG-5, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 |
| P _{8,5%} | ETS-1 | ETS-1, EBG-3 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | |
| P _{14%} | EBG-3, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | |
| P _{15%} | EBG-4, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | |

Tabla 302-5

Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 6 años y módulo resiliente de 12500 psi (CBR = 9%)

| Período de diseño = 6 Años_MR 12500 psi | | | | | | |
|---|------------------|----------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| Tránsito promedio diario | | | | | | |
| Pesados | T ₅₀₀ | T ₈₀₀ | T ₁₂₀₀ | T ₂₀₀₀ | T ₃₅₀₀ | T _{>3500} |
| P _{3%} | ETS-1 | ETS-1 | ETS-1 | ETS-1, EBG-1 | ETS-1, EBG-5 | ETS-2, EBE-2 |
| P _{4%} | ETS-1 | ETS-1 | ETS-1 | ETS-1, EBG-1 | ETS-2, EBE-2 | ETS-2, EBE-2 |
| P _{5%} | ETS-1 | ETS-1 | ETS-1, EBG-1 | ETS-1, EBG-5 | ETS-2, EBE-2 | EBE-2 |
| P _{7%} | ETS-1 | ETS-1, EBG-1 | ETS-1, EBG-1, EBE-2 | ETS-2, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 |
| P _{8,5%} | ETS-1 | ETS-1, EBG-1 | ETS-1, EBG-5 | ETS-2, EBE-2 | EBE-2 | |
| P _{14%} | ETS-1, EBG-1 | EBG-5*, ETS-2, EBE-2 | ETS-2, EBE-2 | EBE-2 | | |
| P _{15%} | ETS-1, EBG-1 | ETS-2, EBE-2 | ETS-2, EBE-2 | EBE-2 | | |

Tabla 302-6

Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 6 años y módulo resiliente de 14200 psi (CBR = 11%)

| Período de diseño = 6 Años_MR 14200 psi | | | | | | |
|---|------------------|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|
| Tránsito promedio diario | | | | | | |
| Pesados | T ₅₀₀ | T ₈₀₀ | T ₁₂₀₀ | T ₂₀₀₀ | T ₃₅₀₀ | T _{>3500} |
| P _{3%} | ETS-1 | ETS-1 | ETS-1 | ETS-1, EBG-1 | ETS-1, EBG-5, EBE-1 | ETS-2, EBE-2 |
| P _{4%} | ETS-1 | ETS-1 | ETS-1 | ETS-1, EBG-1 | ETS-1, EBE-2 | ETS-2, EBE-2 |
| P _{5%} | ETS-1 | ETS-1 | ETS-1, EBG-1 | ETS-1, EBG-5, EBE-1 | ETS-2, EBE-2 | EBE-2 |
| P _{7%} | ETS-1 | ETS-1, EBG-2 | ETS-1, EBG-1 | ETS-1, ETS-2, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 |
| P _{8,5%} | ETS-1 | ETS-1, EBG-1 | ETS-1, EBG-5, EBE-1 | ETS-2, EBE-2 | EBE-2 | |

| Período de diseño = 6 Años_MR 14200 psi | | | | | | |
|---|--------------|---------------------|--------------|-------|--|--|
| Tránsito promedio diario | | | | | | |
| P_{14%} | ETS-1, EBG-1 | ETS-1, EBG-5, EBE-1 | ETS-2, EBE-2 | EBE-2 | | |
| P_{15%} | ETS-1, EBG-1 | ETS-1, EBE-2 | ETS-2, EBE-2 | EBE-2 | | |

Tabla 302-7

Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 8 años y módulo resiliente de 4500 psi (CBR = 3%)

| Período de diseño = 8 Años_MR 4500 psi | | | | | | |
|--|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| Tránsito promedio diario | | | | | | |
| Pesados | T₅₀₀ | T₈₀₀ | T₁₂₀₀ | T₂₀₀₀ | T₃₅₀₀ | T_{>3500} |
| P_{3%} | EBG-1, EBG-2 | EBG-1, EBG-2 | EBG-1, EBG-3 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 |
| P_{4%} | EBG-1, EBG-2 | EBG-1, EBG-3 | EBG-5, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 |
| P_{5%} | EBG-1, EBG-3 | EBG-3, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 |
| P_{7%} | EBG-1, EBG-3 | EBG-5, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | |
| P_{8,5%} | EBG-4, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | |
| P_{14%} | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | | |
| P_{15%} | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | | |

Tabla 302-8

Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 8 años y módulo resiliente de 6000 psi (CBR = 4%)

| Período de diseño = 8 Años_MR 6000 psi | | | | | | |
|--|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| Tránsito promedio diario | | | | | | |
| Pesados | T₅₀₀ | T₈₀₀ | T₁₂₀₀ | T₂₀₀₀ | T₃₅₀₀ | T_{>3500} |
| P_{3%} | EBG-1, EBG-2 | EBG-1, EBG-2 | EBG-1, EBG-3 | EBG-5, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 |
| P_{4%} | EBG-1, EBG-2 | EBG-1, EBG-3 | EBG-4, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 |
| P_{5%} | EBG-1, EBG-2 | EBG-1, EBG-3, EBE-2 | EBG-5, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 |
| P_{7%} | EBG-1, EBG-3 | EBG-5, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | |
| P_{8,5%} | EBG-3, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | |
| P_{14%} | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | | |
| P_{15%} | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | | |

Tabla 302-9

Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 8 años y módulo resiliente de 9000 psi (CBR = 6%)

| Período de diseño = 8 Años_MR 9000 psi | | | | | | |
|--|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| Tránsito promedio diario | | | | | | |
| Pesados | T₅₀₀ | T₈₀₀ | T₁₂₀₀ | T₂₀₀₀ | T₃₅₀₀ | T_{>3500} |
| P_{3%} | ETS-1 | ETS-1 | ETS-1 | EBG-5, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 |
| P_{4%} | ETS-1 | ETS-1 | ETS-1, EBG-3, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 |
| P_{5%} | ETS-1 | ETS-1, EBG-2 | EBG-5, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 |

| Período de diseño = 8 Años_MR 9000 psi | | | | | | |
|--|---------------------|--------------|-------|-------|-------|--|
| Tránsito promedio diario | | | | | | |
| P_{7%} | ETS-1 | EBG-4, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | |
| P_{8,5%} | ETS-1, EBG-3, EBE-2 | EBG-5, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | |
| P_{14%} | EBG-5, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | | |
| P_{15%} | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | | |

Tabla 302-10

Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 8 años y módulo resiliente de 12500 psi (CBR = 9%)

| Período de diseño = 8 Años_MR 12500 psi | | | | | | |
|---|------------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| Tránsito promedio diario | | | | | | |
| Pesados | T₅₀₀ | T₈₀₀ | T₁₂₀₀ | T₂₀₀₀ | T₃₅₀₀ | T_{>3500} |
| P_{3%} | ETS-1 | ETS-1 | ETS-1 | ETS-1, EBG-3, EBE-2 | ETS-2, EBE-2 | ETS-2, EBE-2 |
| P_{4%} | ETS-1 | ETS-1 | ETS-1, EBG-1 | EBG-5, ETS-2, EBE-2 | ETS-2, EBE-2 | EBE-2-1 |
| P_{5%} | ETS-1 | ETS-1, EBG-1 | ETS-1, EBG-1, EBG-3*, EBE-2 | ETS-2, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 |
| P_{7%} | ETS-1 | ETS-1, EBG-1 | ETS-2, EBE-2 | ETS-2, EBE-2 | EBE-2 | |
| P_{8,5%} | ETS-1, EBG-1 | ETS-1, EBG-5, EBE-2 | ETS-2, EBE-2 | EBE-2 | | |
| P_{14%} | ETS-1, EBG-5, EBE-2 | ETS-2, EBE-2 | EBE-2 | | | |
| P_{15%} | ETS-1, EBG-5, EBE-2 | ETS-2, EBE-2 | EBE-2 | | | |

Tabla 302-11

Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 8 años y módulo resiliente de 14200 psi (CBR = 11%)

| Período de diseño = 8 Años_MR 14200 psi | | | | | | |
|---|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| Tránsito promedio diario | | | | | | |
| Pesados | T₅₀₀ | T₈₀₀ | T₁₂₀₀ | T₂₀₀₀ | T₃₅₀₀ | T_{>3500} |
| P_{3%} | ETS-1 | ETS-1 | ETS-1 | ETS-1, EBG-1 | ETS-2, EBE-2 | ETS-2, EBE-2 |
| P_{4%} | ETS-1 | ETS-1 | ETS-1, EBG-1 | ETS-1, EBE-1 | ETS-2, EBE-2 | EBE-2-1 |
| P_{5%} | ETS-1 | ETS-1, EBG-2 | ETS-1, EBG-1 | ETS-1, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 |
| P_{7%} | ETS-1 | ETS-1, EBG-1 | ETS-1, EBE-1 | ETS-2, EBE-2 | EBE-2 | |
| P_{8,5%} | ETS-1, EBG-1 | ETS-1, EBE-1 | ETS-1, EBE-2 | EBE-2 | | |
| P_{14%} | ETS-1, EBE-1 | ETS-2, EBE-2 | EBE-2 | | | |
| P_{15%} | ETS-1, EBE-1 | ETS-2, EBE-2 | EBE-2 | | | |

Tabla 302-12

Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 10 años y módulo resiliente de 4500 psi (CBR = 3%)

| Período de diseño = 10 Años_MR 4500 psi | | | | | | |
|---|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| Tránsito promedio diario | | | | | | |
| Pesados | T ₅₀₀ | T ₈₀₀ | T ₁₂₀₀ | T ₂₀₀₀ | T ₃₅₀₀ | T _{>3500} |
| P _{3%} | EBG-1, EBG-2 | EBG-1, EBG-3 | EBG-5, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 |
| P _{4%} | EBG-1, EBG-3 | EBG-4, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 |
| P _{5%} | EBG-1, EBG-3 | EBG-5, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | |
| P _{7%} | EBG-4, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | |
| P _{8,5%} | EBG-5, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | |
| P _{14%} | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | | |
| P _{15%} | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | | |

Tabla 302-13

Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 10 años y módulo resiliente de 6000 psi (CBR = 4%)

| Período de diseño = 10 Años_MR 6000 psi | | | | | | |
|---|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| Tránsito promedio diario | | | | | | |
| Pesados | T ₅₀₀ | T ₈₀₀ | T ₁₂₀₀ | T ₂₀₀₀ | T ₃₅₀₀ | T _{>3500} |
| P _{3%} | EBG-2, EBG-1 | EBG-1, EBG-3 | EBG-4, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 |
| P _{4%} | EBG-1, EBG-2 | EBG-3, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 |
| P _{5%} | EBG-1, EBG-3 | EBG-5, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | |
| P _{7%} | EBG-4, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | |
| P _{8,5%} | EBG-5, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | |
| P _{14%} | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | | |
| P _{15%} | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | | |

Tabla 302-14

Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 10 años y módulo resiliente de 9000 psi (CBR = 6%)

| Período de diseño = 10 Años_MR 9000 psi | | | | | | |
|---|---------------------|------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| Tránsito promedio diario | | | | | | |
| Pesados | T ₅₀₀ | T ₈₀₀ | T ₁₂₀₀ | T ₂₀₀₀ | T ₃₅₀₀ | T _{>3500} |
| P _{3%} | ETS-1 | ETS-1 | ETS-1, EBG-3, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 |
| P _{4%} | ETS-1 | ETS-1, EBG-3 | EBG-5, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 |
| P _{5%} | ETS-1 | EBG-3, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | |
| P _{7%} | ETS-1, EBG-3, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | |
| P _{8,5%} | EBG-4, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | |
| P _{14%} | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | | |
| P _{15%} | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | | |

Tabla 302-15

Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 10 años y módulo resiliente de 12500 psi (CBR = 9%)

| Período de diseño = 10 Años_MR 12500 psi | | | | | | |
|--|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------|-----------------------|
| Tránsito promedio diario | | | | | | |
| Pesados | T ₅₀₀ | T ₈₀₀ | T ₁₂₀₀ | T ₂₀₀₀ | T ₃₅₀₀ | T _{>3500} |
| P _{3%} | ETS-1 | ETS-1 | ETS-1, EBG-1 | EBG-5, ETS-2, EBE-2 | ETS-2, EBE-2 | EBE-2 |
| P _{4%} | ETS-1 | ETS-1, EBG-1 | ETS-1, EBG-5, EBE-2 | ETS-2, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 |
| P _{5%} | ETS-1 | ETS-1, EBG-1 | EBG-5, ETS-2, EBE-2 | ETS-2, EBE-2 | EBE-2 | |
| P _{7%} | ETS-1, EBG-1 | ETS-1, EBG-5, EBE-2 | ETS-2, EBE-2 | EBE-2 | | |
| P _{8,5%} | ETS-1, EBG-1 | ETS-2, EBE-2 | ETS-2, EBE-2 | EBE-2 | | |
| P _{14%} | ETS-2, EBE-2 | ETS-2, EBE-2 | EBE-2 | | | |
| P _{15%} | ETS-2, EBE-2 | ETS-2, EBE-2 | EBE-2 | | | |

Tabla 302-16

Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 10 años y módulo resiliente de 14200 psi (CBR = 11%)

| Período de diseño = 10 Años_MR 14200 psi | | | | | | |
|--|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------|-----------------------|
| Tránsito promedio diario | | | | | | |
| Pesados | T ₅₀₀ | T ₈₀₀ | T ₁₂₀₀ | T ₂₀₀₀ | T ₃₅₀₀ | T _{>3500} |
| P _{3%} | ETS-1 | ETS-1 | ETS-1, EBG-1 | ETS-1, EBG-5, EBE-1 | ETS-2, EBE-2 | EBE-2 |
| P _{4%} | ETS-1 | ETS-1, EBG-1 | ETS-1, EBG-1 | ETS-2, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 |
| P _{5%} | ETS-1 | ETS-1, EBG-1 | ETS-1, EBG-5, EBE-1 | ETS-2, EBE-2 | EBE-2 | |
| P _{7%} | ETS-1, EBG-1 | ETS-1, EBG-5, EBE-1 | ETS-2, EBE-2 | EBE-2 | | |
| P _{8,5%} | ETS-1, EBG-1 | ETS-1, EBE-1 | ETS-2, EBE-2 | EBE-2 | | |
| P _{14%} | ETS-1, EBE-2 | ETS-2, EBE-2 | EBE-2 | | | |
| P _{15%} | ETS-1, ETS-2, EBE-2 | ETS-2, EBE-2 | EBE-2 | | | |

Tabla 302-17

Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 12 años y módulo resiliente de 4500 psi (CBR = 3%)

| Período de diseño = 12 Años_MR 4500 psi | | | | | | |
|---|------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| Tránsito promedio diario | | | | | | |
| Pesados | T ₅₀₀ | T ₈₀₀ | T ₁₂₀₀ | T ₂₀₀₀ | T ₃₅₀₀ | T _{>3500} |
| P _{3%} | EBG-1, EBG-2 | EBG-1, EBG-3, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 |
| P _{4%} | EBG-1, EBG-3 | EBG-5, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | |
| P _{5%} | EBG-3, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | |
| P _{7%} | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | |

| | | | | | | |
|-------------------|-------|-------|-------|--|--|--|
| P _{8,5%} | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | | |
| P _{14%} | EBE-2 | EBE-2 | | | | |
| P _{15%} | EBE-2 | EBE-2 | | | | |

Tabla 302-18

Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 12 años y módulo resiliente de 6000 psi (CBR = 4%)

| Período de diseño = 12 Años_MR 6000 psi | | | | | | |
|---|---------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| Tránsito promedio diario | | | | | | |
| Pesados | T ₅₀₀ | T ₈₀₀ | T ₁₂₀₀ | T ₂₀₀₀ | T ₃₅₀₀ | T _{>3500} |
| P _{3%} | EBG-1, EBG-2 | EBG-1, EBG-3, EBE-2 | EBG-5, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 |
| P _{4%} | EBG-1, EBG-3 | EBG-5, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | |
| P _{5%} | EBG-1, EBG-3, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | |
| P _{7%} | EBG-5, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | |
| P _{8,5%} | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | | |
| P _{14%} | EBE-2 | EBE-2 | | | | |
| P _{15%} | EBE-2 | EBE-2 | | | | |

Tabla 302-19

Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 12 años y módulo resiliente de 9000 psi (CBR = 6%)

| Período de diseño = 12 Años_MR 9000 psi | | | | | | |
|---|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| Tránsito promedio diario | | | | | | |
| Pesados | T ₅₀₀ | T ₈₀₀ | T ₁₂₀₀ | T ₂₀₀₀ | T ₃₅₀₀ | T _{>3500} |
| P _{3%} | EBG-1, EBG-2 | EBG-1, EBG-3 | EBG-5, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 |
| P _{4%} | EBG-1, EBG-3 | EBG-3, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | |
| P _{5%} | EBG-1, EBG-3 | EBG-5, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | |
| P _{7%} | EBG-5, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | |
| P _{8,5%} | EBG-5, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | | |
| P _{14%} | EBE-2 | EBE-2 | | | | |
| P _{15%} | EBE-2 | EBE-2 | | | | |

Tabla 302-20

Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 12 años y módulo resiliente de 12500 psi (CBR = 9%)

| Período de diseño = 12 Años_MR 12500 psi | | | | | | |
|--|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| Tránsito promedio diario | | | | | | |
| Pesados | T ₅₀₀ | T ₈₀₀ | T ₁₂₀₀ | T ₂₀₀₀ | T ₃₅₀₀ | T _{>3500} |
| P _{3%} | EBG-1, EBG-2 | EBG-1, EBG-3 | EBG-1, EBG-3 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 |
| P _{4%} | EBG-1, EBG-2 | EBG-1, EBG-3 | EBG-5, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | |
| P _{5%} | EBG-1, EBG-3 | EBG-5, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | |
| P _{7%} | EBG-1, EBG-3 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | |
| P _{8,5%} | EBG-5, EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | | |

| | | | | | | |
|------------------|-------|-------|--|--|--|--|
| P _{14%} | EBE-2 | EBE-2 | | | | |
| P _{15%} | EBE-2 | EBE-2 | | | | |

Tabla 302-21

Resumen de estructuras recomendadas; periodo de diseño de 12 años y módulo resiliente de 14200 psi (CBR = 11%)

| Período de diseño = 12 Años_MR 14200 psi | | | | | | |
|--|------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| Tránsito promedio diario | | | | | | |
| Pesados | T ₅₀₀ | T ₈₀₀ | T ₁₂₀₀ | T ₂₀₀₀ | T ₃₅₀₀ | T _{>3500} |
| P _{3%} | EBG-1, EBG-2 | EBG-2, EBG-1 | EBG-1, EBG-3 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 |
| P _{4%} | EBG-1, EBG-2 | EBG-1, EBG-3 | EBG-5, EBE-1 | EBE-2 | EBE-2 | |
| P _{5%} | EBG-1, EBG-3 | EBG-4, EBG-1, EBE-1 | EBE-2 | EBE-2 | | |
| P _{7%} | EBG-1, EBG-3 | EBE-2 | EBE-2 | EBE-2 | | |
| P _{8,5%} | EBG-5, EBE-1 | EBE-2 | EBE-2 | | | |
| P _{14%} | EBE-2 | EBE-2 | | | | |
| P _{15%} | EBE-2 | EBE-2 | | | | |

SECCIÓN 303: CONSIDERACIONES FINALES

La presente guía resume la propuesta de estructuras que forma parte del catálogo de diseño simplificado de pavimentos, optimizado el rango en el que cada una de las estructuras propuestas es funcional, utilizando criterios de diseño de mecanístico-empírico.

Se revisaron un total de 18 estructuras diferentes y cada una de ellas se modeló para los 5 niveles de subrasante, utilizando conceptos avanzados de la mecánica de materiales como, módulo dinámico y verificación de módulos resilientes por estado de esfuerzos para materiales costarricenses, antes de verificar su desempeño.

Las verificaciones por desempeño realizadas, garantizan que las estructuras propuestas funcionan para una categoría de ESALs y cada una de ellas fue asignada según su robustez y rango adecuado de trabajo.

Los resultados expuestos en esta guía son producto de 364 diseños por AASHTO 1993, 390 modelaciones para verificación y modelación de módulos y 90 modelaciones para predicción de desempeño, por lo que se provee de un amplio espectro de verificación para recomendar las 9 estructuras finales.

Se determinó que todas las configuraciones de carga pueden ser cubiertas por 9 estructuras, las cuales brindaron el mejor desempeño para su respectivo rango de trabajo sobre las 18 revisadas, esto para todos los niveles de subrasante analizados.

La presente guía se encuentra enfocada a brindar una solución de diseño, simple, eficiente y de rápido manejo para rutas de bajo volumen, que para el alcance de esta guía se definió en 1,5 millones de ejes equivalentes. Para mayor detalle se puede consultar el documento, "Propuesta para una guía de diseño de bajo volumen para pavimentos flexibles y semirrígidos", Informe LM-PI-GM-INF-05-16, (Arias 2017).

Se prevé que este catálogo estará acompañado de una herramienta de cómputo para simplificar su uso, llamada "Herramienta para diseño simplificado", que permite guiar al usuario a través del proceso de selección, capturas de esta herramienta se puede observar

en el Anexo 3. Además, se prevé que en futuras actualizaciones se incorporen más estructuras según la retroalimentación obtenida.

REFERENCIAS

- AASHTO. (1993). Guide for Design of Pavement Structures. Washington, DC: AASHTO.
- Arias, E. (2012). Evaluación de la Red Vial Cantonal de Cañas: Diagnóstico y Tramos Homogéneos de la Red Vial Cantonal de Cañas. San Pedro: LanammeUCR.
- Arias, E. (2017). Propuesta para una guía de diseño de bajo volumen para pavimentos flexibles y semirrígidos. San Pedro: LanammeUCR.
- Arias, E. (2019). Guía de Diseño Simplificado para Pavimentos Flexibles y Semirrígidos de Bajo Volumen. San Pedro: LanammeUCR.
- Cook, J. R., Petts, R. C., & Rolt, J. (2013). Low volume rural road surfacing and pavements, a guide to good practice. Londres: OTB Engineering UK LLP .
- Department of Transport Republic of Sudafrica. (1996). TRH4: Structural Design of Flexible Pavement for Interurban and Rural Roads. Pretoria, Sudáfrica.
- Dirección de Viabilidad del Ministerio de Obras Públicas de Chile. (2002). Guía de diseño estructural de pavimentos para caminos de bajo volumen de tránsito. Chile.
- Keller, G., & Sherar, J. (2008). Ingeniería de caminos rurales, guía de campo para las mejores prácticas de gestión de caminos. México: Secretaria de Comunicaciones y Transportes .
- LanammeUCR. (2016). Fotografía contador de Radar. Obtenido de Base de datos UGM LanammeUCR
- Meyer, W., & Reichert, J. (1990). Surface Characteristics of Roadways: International Research and Technologies, ASTM STP 1031. Philadelphia,PA: American Society for Testing and Materials.
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Costa Rica. (2010). Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes CR-2010. Republica de Costa Rica.
- Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (2008). Manual para el diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito. Lima, Perú.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú. (2008). Manual de diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito. Lima: Tarea Asociación Gráfica Educativa.
- National Cooperative Highway Research Program. (2004). Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Illinois: NCHPR.
- National Cooperative Highway Research Program. (Enero de 2004). Research Results Digest 285. Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design.
- Texas Department of Transportation. (2012). Traffic Recorder Instruction Manual. Austin: Texas Department of Transportation.
- Zuñiga, J. C. (2017). Anuario de Información de Tránsito 2017. San José: Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Costa Rica.

ANEXO

ANEXO 1. ESTACIONES METEOROLÓGICAS CONSIDERADAS

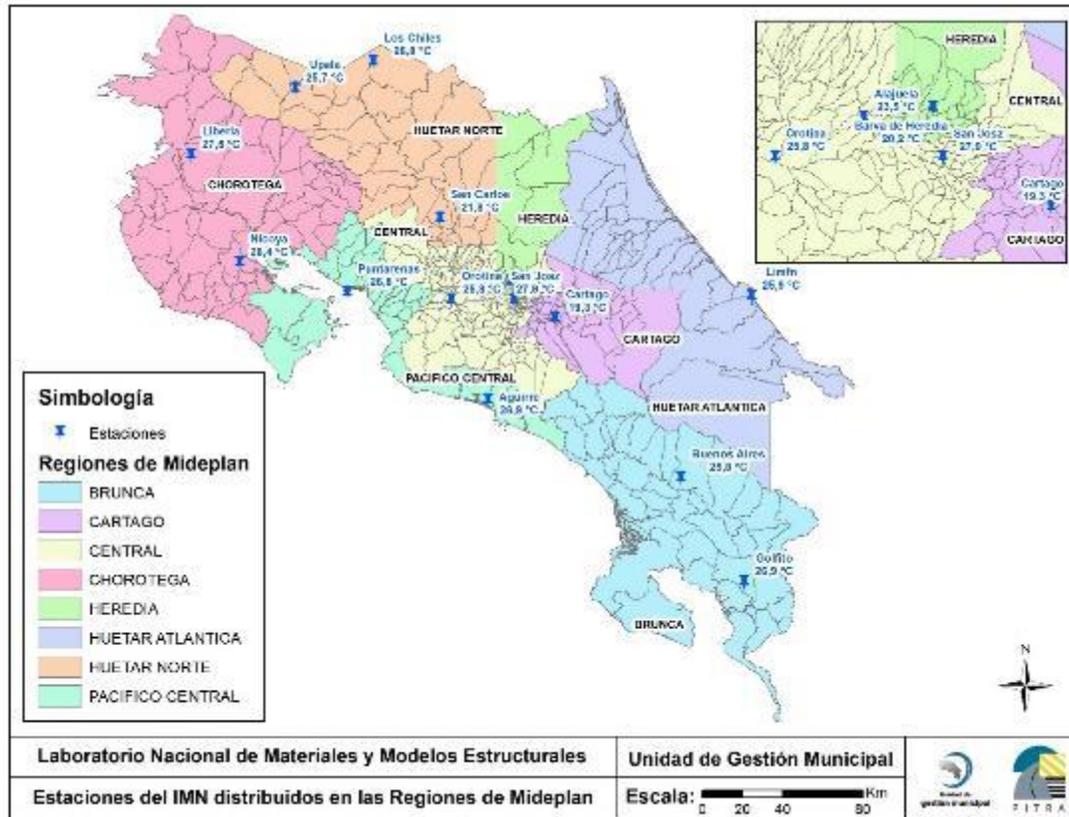


Figura A1-1. Mapa de ubicación de estaciones meteorológicas consideradas

Tabla A1-1.
Datos de temperatura para Upala

| Upala | | | | | | |
|-----------------------|-------|------------------------|-------|-------------|-----------------------|---------------|
| Temperatura Max. Aire | | Temperatura Prom. Aire | | Profundidad | | Latitud |
| °C | °F | °C | °F | mm | in | ° decimales |
| 31,08 | 87,94 | 25,7 | 78,25 | 37,50 | 1,48 | 10,88 |
| Modelos | | | | | Temperatura Pavimento | |
| | | | | | °C | °F |
| SHRP | | | | | 46,35 | 115,43 |
| LTPP | | | | | 46,88 | 116,38 |
| Instituto del Asfalto | | | | | 33,52 | 92,33 |
| Witczak | | | | | 49,93 | 121,87 |
| Promedio | | | | | 47,72 | 117,89 |

Tabla A1-2.

Datos de temperatura para Los Chiles

| Los Chiles | | | | | | |
|-----------------------|-------|------------------------|-------|-------------|-----------------------|---------------|
| Temperatura Max. Aire | | Temperatura Prom. Aire | | Profundidad | | Latitud |
| °C | °F | °C | °F | mm | in | ° decimales |
| 31,55 | 88,79 | 26,82 | 80,27 | 37,50 | 1,48 | 11,00 |
| Modelos | | | | | Temperatura Pavimento | |
| | | | | | °C | °F |
| SHRP | | | | | 47,39 | 117,31 |
| LTPP | | | | | 47,74 | 117,94 |
| Instituto del Asfalto | | | | | 34,84 | 94,72 |
| Witczak | | | | | 50,96 | 123,73 |
| Promedio | | | | | 48,70 | 119,66 |

Tabla A1-3.

Datos de temperatura para San Carlos

| San Carlos | | | | | | |
|-----------------------|-------|------------------------|-------|-------------|-----------------------|---------------|
| Temperatura Max. Aire | | Temperatura Prom. Aire | | Profundidad | | Latitud |
| °C | °F | °C | °F | mm | in | ° decimales |
| 25,51 | 77,92 | 21,82 | 71,28 | 37,50 | 1,48 | 10,30 |
| Modelos | | | | | Temperatura Pavimento | |
| | | | | | °C | °F |
| SHRP | | | | | 42,73 | 108,91 |
| LTPP | | | | | 43,89 | 110,99 |
| Instituto del Asfalto | | | | | 28,94 | 84,08 |
| Witczak | | | | | 46,36 | 115,46 |
| Promedio | | | | | 44,33 | 111,79 |

Tabla A1-4.

Datos de temperatura para Liberia

| Liberia | | | | | | |
|-----------------------|-------|------------------------|---------|-------------|-----------------------|---------------|
| Temperatura Max. Aire | | Temperatura Prom. Aire | | Profundidad | | Latitud |
| °C | °F | °C | °F | mm | in | ° decimales |
| 32,96 | 91,33 | 27,5375 | 81,5675 | 37,50 | 1,48 | 10,58 |
| Modelos | | | | | Temperatura Pavimento | |
| | | | | | °C | °F |
| SHRP | | | | | 48,02 | 118,44 |
| LTPP | | | | | 48,33 | 118,99 |
| Instituto del Asfalto | | | | | 35,70 | 96,25 |
| Witczak | | | | | 51,62 | 124,92 |
| Promedio | | | | | 49,32 | 120,78 |

Tabla A1-5.
Datos de temperatura para Nicoya

| Nicoya | | | | | | |
|-----------------------|-------|------------------------|-------|-------------|-----------------------|---------------|
| Temperatura Max. Aire | | Temperatura Prom. Aire | | Profundidad | | Latitud |
| °C | °F | °C | °F | mm | in | ° decimales |
| 33,60 | 92,48 | 28,40 | 83,12 | 37,50 | 1,48 | 10,10 |
| Modelos | | | | | Temperatura Pavimento | |
| | | | | | °C | °F |
| SHRP | | | | | 48,77 | 119,79 |
| LTPP | | | | | 49,03 | 120,25 |
| Instituto del Asfalto | | | | | 36,72 | 98,09 |
| Witczak | | | | | 52,42 | 126,35 |
| Promedio | | | | | 50,07 | 122,13 |

Tabla A1-6.
Datos de temperatura para Puntarenas

| Puntarenas | | | | | | |
|-----------------------|-------|------------------------|--------|-------------|-----------------------|---------------|
| Temperatura Max. Aire | | Temperatura Prom. Aire | | Profundidad | | Latitud |
| °C | °F | °C | °F | mm | in | ° decimales |
| 29,63 | 85,33 | 26,81 | 80,255 | 37,50 | 1,48 | 9,97 |
| Modelos | | | | | Temperatura Pavimento | |
| | | | | | °C | °F |
| SHRP | | | | | 47,29 | 117,12 |
| LTPP | | | | | 47,79 | 118,03 |
| Instituto del Asfalto | | | | | 34,83 | 94,70 |
| Witczak | | | | | 50,95 | 123,71 |
| Promedio | | | | | 48,68 | 119,62 |

Tabla A1-7.
Datos de temperatura para San José

| San José | | | | | | |
|-----------------------|-------|------------------------|-------|-------------|-----------------------|---------------|
| Temperatura Max. Aire | | Temperatura Prom. Aire | | Profundidad | | Latitud |
| °C | °F | °C | °F | mm | in | ° decimales |
| 24,91 | 76,84 | 21,13 | 70,03 | 37,5 | 1,48 | 9,93 |
| Modelos | | | | | Temperatura Pavimento | |
| | | | | | °C | °F |
| SHRP | | | | | 42,05 | 107,70 |
| LTPP | | | | | 43,36 | 110,05 |
| Instituto del Asfalto | | | | | 28,11 | 82,60 |
| Witczak | | | | | 45,72 | 114,30 |
| Promedio | | | | | 43,71 | 110,68 |

Tabla A1-8.

Datos de temperatura para Alajuela

| Alajuela | | | | | | |
|-----------------------|-------|------------------------|-------|-----------------------|---------------|-------------|
| Temperatura Max. Aire | | Temperatura Prom. Aire | | Profundidad | | Latitud |
| °C | °F | °C | °F | mm | in | ° decimales |
| 28,40 | 83,12 | 23,52 | 74,34 | 37,5 | 1,48 | 10,00 |
| Modelos | | | | Temperatura Pavimento | | |
| | | | | °C | °F | |
| SHRP | | | | 44,27 | 111,68 | |
| LTPP | | | | 45,23 | 113,41 | |
| Instituto del Asfalto | | | | 30,95 | 87,70 | |
| Witczak | | | | 47,93 | 118,27 | |
| Promedio | | | | 45,81 | 114,45 | |

Tabla A1-9.

Datos de temperatura para Barva de Heredia

| Barva de Heredia | | | | | | |
|-----------------------|-------|------------------------|-------|-----------------------|---------------|-------------|
| Temperatura Max. Aire | | Temperatura Prom. Aire | | Profundidad | | Latitud |
| °C | °F | °C | °F | mm | in | ° decimales |
| 25,18 | 77,33 | 20,22 | 68,40 | 37,5 | 1,48 | 10,02 |
| Modelos | | | | Temperatura Pavimento | | |
| | | | | °C | °F | |
| SHRP | | | | 41,23 | 106,21 | |
| LTPP | | | | 42,65 | 108,77 | |
| Instituto del Asfalto | | | | 27,04 | 80,68 | |
| Witczak | | | | 44,89 | 112,81 | |
| Promedio | | | | 42,92 | 109,26 | |

Tabla A1-10.

Datos de temperatura para Cartago

| Cartago | | | | | | |
|-----------------------|-------|------------------------|-------|-----------------------|---------------|-------------|
| Temperatura Max. Aire | | Temperatura Prom. Aire | | Profundidad | | Latitud |
| °C | °F | °C | °F | mm | in | ° decimales |
| 23,73 | 74,71 | 19,33 | 66,80 | 37,5 | 1,48 | 9,85 |
| Modelos | | | | Temperatura Pavimento | | |
| | | | | °C | °F | |
| SHRP | | | | 40,40 | 104,71 | |
| LTPP | | | | 41,97 | 107,54 | |
| Instituto del Asfalto | | | | 25,99 | 78,79 | |
| Witczak | | | | 44,08 | 111,34 | |
| Promedio | | | | 42,15 | 107,86 | |

Tabla A1-11.

Datos de temperatura para Buenos Aires

| Buenos Aires | | | | | | |
|-----------------------|-------|------------------------|-------|-------------|-----------------------|---------------|
| Temperatura Max. Aire | | Temperatura Prom. Aire | | Profundidad | | Latitud |
| °C | °F | °C | °F | mm | in | ° decimales |
| 31,17 | 88,10 | 25,85 | 78,53 | 37,5 | 1,48 | 9,13 |
| Modelos | | | | | Temperatura Pavimento | |
| | | | | | °C | °F |
| SHRP | | | | | 46,32 | 115,38 |
| LTPP | | | | | 47,08 | 116,75 |
| Instituto del Asfalto | | | | | 33,70 | 92,66 |
| Witczak | | | | | 50,07 | 122,13 |
| Promedio | | | | | 47,83 | 118,09 |

Tabla A1-12.

Datos de temperatura para Aguirre

| Aguirre | | | | | | |
|-----------------------|-------|------------------------|-------|-------------|-----------------------|---------------|
| Temperatura Max. Aire | | Temperatura Prom. Aire | | Profundidad | | Latitud |
| °C | °F | °C | °F | mm | in | ° decimales |
| 30,98 | 87,77 | 26,88 | 80,38 | 37,5 | 1,48 | 9,48 |
| Modelos | | | | | Temperatura Pavimento | |
| | | | | | °C | °F |
| SHRP | | | | | 47,30 | 117,15 |
| LTPP | | | | | 47,87 | 118,16 |
| Instituto del Asfalto | | | | | 34,91 | 94,84 |
| Witczak | | | | | 51,01 | 123,82 |
| Promedio | | | | | 48,73 | 119,71 |

Tabla A1-13.

Datos de temperatura para Golfito

| Golfito | | | | | | |
|-----------------------|-------|------------------------|-------|-------------|-----------------------|---------------|
| Temperatura Max. Aire | | Temperatura Prom. Aire | | Profundidad | | Latitud |
| °C | °F | °C | °F | mm | in | ° decimales |
| 31,79 | 89,23 | 26,85 | 80,34 | 37,5 | 1,48 | 8,67 |
| Modelos | | | | | Temperatura Pavimento | |
| | | | | | °C | °F |
| SHRP | | | | | 47,20 | 116,96 |
| LTPP | | | | | 47,89 | 118,20 |
| Instituto del Asfalto | | | | | 34,89 | 94,80 |
| Witczak | | | | | 50,99 | 123,79 |
| Promedio | | | | | 48,69 | 119,65 |

Tabla A1-14.

Datos de temperatura para Limón

| Limón | | | | | | |
|-----------------------|-------|------------------------|-------|-----------------------|---------------|-------------|
| Temperatura Max. Aire | | Temperatura Prom. Aire | | Profundidad | | Latitud |
| °C | °F | °C | °F | mm | in | ° decimales |
| 29,79 | 85,63 | 25,88 | 78,58 | 37,5 | 1,48 | 9,95 |
| Modelos | | | | Temperatura Pavimento | | |
| | | | | °C | °F | |
| SHRP | | | | 46,43 | 115,57 | |
| LTPP | | | | 47,07 | 116,72 | |
| Instituto del Asfalto | | | | 33,73 | 92,71 | |
| Witczak | | | | 50,09 | 122,17 | |
| Promedio | | | | 47,86 | 118,15 | |

Tabla A1-15.

Datos de temperatura para Orotina

| Orotina | | | | | | |
|-----------------------|-------|------------------------|-------|-----------------------|---------------|-------------|
| Temperatura Max. Aire | | Temperatura Prom. Aire | | Profundidad | | Latitud |
| °C | °F | °C | °F | mm | in | ° decimales |
| 31,33 | 88,40 | 25,76 | 78,37 | 37,5 | 1,48 | 9,93 |
| Modelos | | | | Temperatura Pavimento | | |
| | | | | °C | °F | |
| SHRP | | | | 46,32 | 115,38 | |
| LTPP | | | | 46,98 | 116,56 | |
| Instituto del Asfalto | | | | 33,59 | 92,47 | |
| Witczak | | | | 49,99 | 121,98 | |
| Promedio | | | | 47,76 | 117,97 | |

ANEXO 2. MÓDULO DINÁMICO

Módulo dinámico de la mezcla asfáltica

El módulo dinámico de la mezcla asfáltica se ha adoptado en las metodologías de diseño mecanicista para definir la rigidez del material, tomando en cuenta su comportamiento viscoelástico lineal. El concepto de viscoelasticidad implica que la rigidez de la mezcla asfáltica se ve afectada por dos variables específicas: la temperatura del material y la velocidad o frecuencia de carga. Por esto, es esencial contar con una correcta caracterización de dichas variables al diseñar la estructura de un pavimento flexible.

A continuación, se detallan las consideraciones tomadas para definir las variables de temperatura y frecuencia de carga, que fueron utilizadas para determinar el módulo dinámico de la mezcla asfáltica empleado en las modelaciones de las distintas estructuras de pavimento propuestas en esta guía.

Datos generales

Para este proyecto se evaluaron dos mezclas asfálticas producidas en distintas plantas del país. En la Tabla A2.1 se muestran las características volumétricas generales y la granulometría de las distintas mezclas consideradas.

Tabla A2-1.

Granulometría y características volumétricas generales de las mezclas evaluadas

| | Parámetro | Planta A | Planta B | |
|------------------------------|--|----------|----------|-------|
| Datos generales | Granulometría (porcentaje pasando por peso) | 19,0mm | 100 | 100 |
| | | 12,5mm | 95,90 | 91,80 |
| | | 9,5mm | 83,20 | 77,00 |
| | | N. 4 | 54,30 | 46,70 |
| | | N. 8 | 38,10 | 31,10 |
| | | N. 16 | 26,68 | 21,83 |
| | | N. 30 | 19,25 | 16,33 |
| | | N. 50 | 13,36 | 12,09 |
| | | N. 100 | 9,03 | 8,71 |
| | N. 200 | 6,69 | 6,22 | |
| | Gravedad específica bruta | | 2,389 | 2,364 |
| | Gravedad máxima teórica | | 2,459 | 2,494 |
| | Vacíos Marshall (%) | | 2,9 | 5,2 |
| | % Asfalto óptimo sobre la mezcla | | 6,5 | 5,4 |
| | Estabilidad Marshall (kg) | | 2129 | 2385 |
| Flujo Marshall (1/100cm) | | 33,0 | 31,4 | |
| Relación Polvo/asfalto-total | | 1,0 | 1,2 | |

Temperatura del pavimento

Las temperaturas utilizadas para determinar los módulos dinámicos se obtuvieron a partir de datos históricos de distintas estaciones climáticas del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) de Costa Rica. Para contar con un amplio espectro de datos se analizaron en total 13 zonas del país (ver Anexo 1). En cada una de las zonas se contaba con temperaturas promedio mensuales que fueron utilizadas para obtener un valor promedio de temperatura anual.

Es importante mencionar que los datos de temperatura de las estaciones climáticas son datos de temperatura del aire. Sin embargo, para el cálculo de los módulos dinámicos es necesario conocer la temperatura del pavimento, por lo tanto, se utilizaron cuatro modelos matemáticos distintos para transformar la temperatura del aire en temperatura del pavimento. Específicamente se utilizaron los modelos del Strategic Highway Research Program (SHRP), el Long Term Pavement Performance (LTPP) y el Instituto del Asfalto de Estados Unidos. Además, se utilizó un modelo propuesto por Witczak (1992). A continuación, se muestran las expresiones utilizadas:

- SHRP: $T_{sup} = T_{aire} - 0,00618 * Lat^2 + 0,2289 * Lat + 24,4$ Ecuación A1
 $T_{pav} = T_{sup}(1 - 0,063 * h + 0,007 * h^2 - 0,0004 * h^3)$ Ecuación A2
- LTPP: $T_{pav} = 54,32 + 0,78 * T_{aire} - 0,0025 * Lat^2 - 15,14$ Ecuación A3
 $* \log_{10}(h + 25)$
- Instituto del Asfalto: $T_{pav} = T_{aire} \left[1 + \frac{1}{(h + 4)} \right] - \frac{34}{(h + 4)} + 6$ Ecuación A4
- Witczak: $T_{pav} = 58 - 5,5 * (h) + 0,92 * (T_{aire})$ Ecuación A5

Donde T_{pav} es la temperatura del pavimento en °F, T_{sup} es la temperatura superficial del pavimento en °F, T_{aire} es la temperatura promedio del aire en °F, Lat es la latitud de la zona en grados (°) y h es la profundidad en la mezcla asfáltica en pulgadas (in). Con los modelos anteriores se determinó la temperatura promedio del pavimento para cada de las zonas del país analizadas.

Frecuencia de carga

Para determinar la frecuencia de carga a utilizar en el cálculo de los módulos dinámicos de las mezclas evaluadas, se asumió una velocidad de tránsito vehicular de 60 km/h para las vías cantonales. Con base en esto, se utilizó la ecuación propuesta por Richard Barksdale en 1971 (Ecuación A6) para correlacionar la velocidad de tránsito con la frecuencia de carga, obteniéndose una frecuencia asociada de 36,2 Hz. La ecuación mencionada se muestra a continuación:

$$\log(t) = -0,95 * \log(v) + 0,0207 * h - 0,087 \quad \text{Ecuación A6}$$

Donde t es el tiempo de carga en segundos (s), v es la velocidad de tránsito en millas por hora (mph) y h es el espesor de la carpeta en pulgadas (in). A partir de la ecuación anterior se determina la frecuencia de carga con la relación:

$$f = \frac{1}{t} \quad \text{Ecuación A7}$$

Resultados de módulo dinámico

Para determinar el valor de módulo dinámico para las distintas mezclas analizadas se utilizó el concepto de la curva maestra. Los resultados se presentan resumidos en la siguiente tabla:

Tabla A2-2.

Resumen de datos de módulo dinámico

| Cantón | Temperatura Prom. Pavimento | | Frecuencia (Hz) | Módulos dinámicos (ksi) para temperaturas promedio | | Promedio |
|------------------|-----------------------------|--------|-------------------------|--|--------------|---------------|
| | (°C) | (°F) | | Planta A (1) | Planta B (2) | |
| | | | | (12,5 mm) | (12,5 mm) | |
| Upala | 47,72 | 117,89 | 36,20 | 188,30 | 313,60 | 250,95 |
| Los Chiles | 48,70 | 119,66 | 36,20 | 173,70 | 294,30 | 234,00 |
| San Carlos | 44,33 | 111,79 | 36,20 | 252,20 | 394,50 | 323,35 |
| Puntarenas | 48,68 | 119,62 | 36,20 | 174,00 | 294,70 | 234,35 |
| San José | 43,71 | 110,68 | 36,20 | 266,60 | 412,00 | 339,30 |
| Alajuela | 45,81 | 114,45 | 36,20 | 221,50 | 356,20 | 288,85 |
| Barva de Heredia | 42,92 | 109,26 | 36,20 | 286,40 | 435,30 | 360,85 |
| Cartago | 42,15 | 107,86 | 36,20 | 305,10 | 454,20 | 379,65 |
| Buenos Aires | 47,83 | 118,09 | 36,20 | 186,60 | 311,40 | 249,00 |
| Aguirre | 48,73 | 119,71 | 36,20 | 173,30 | 293,80 | 233,55 |
| Golfito | 48,69 | 119,65 | 36,20 | 173,80 | 294,40 | 234,10 |
| Limón | 47,86 | 118,15 | 36,20 | 186,10 | 310,70 | 248,40 |
| Orotina | 47,76 | 117,97 | 36,20 | 187,70 | 312,70 | 250,20 |
| | | | Promedio General | 213,48 | 344,45 | 278,97 |

El valor promedio para las dos mezclas analizadas y todas las temperaturas del país fue de 279 ksi, tal como se observa en la tabla anterior. Dicho valor de módulo fue utilizado en todas las modelaciones para realizar los análisis mecánico-empíricos de las estructuras propuestas en esta guía.

ANEXO 3. VISTA PRELIMINAR HERRAMIENTA DE DISEÑO



Figura A3-1. Vista principal herramienta de diseño

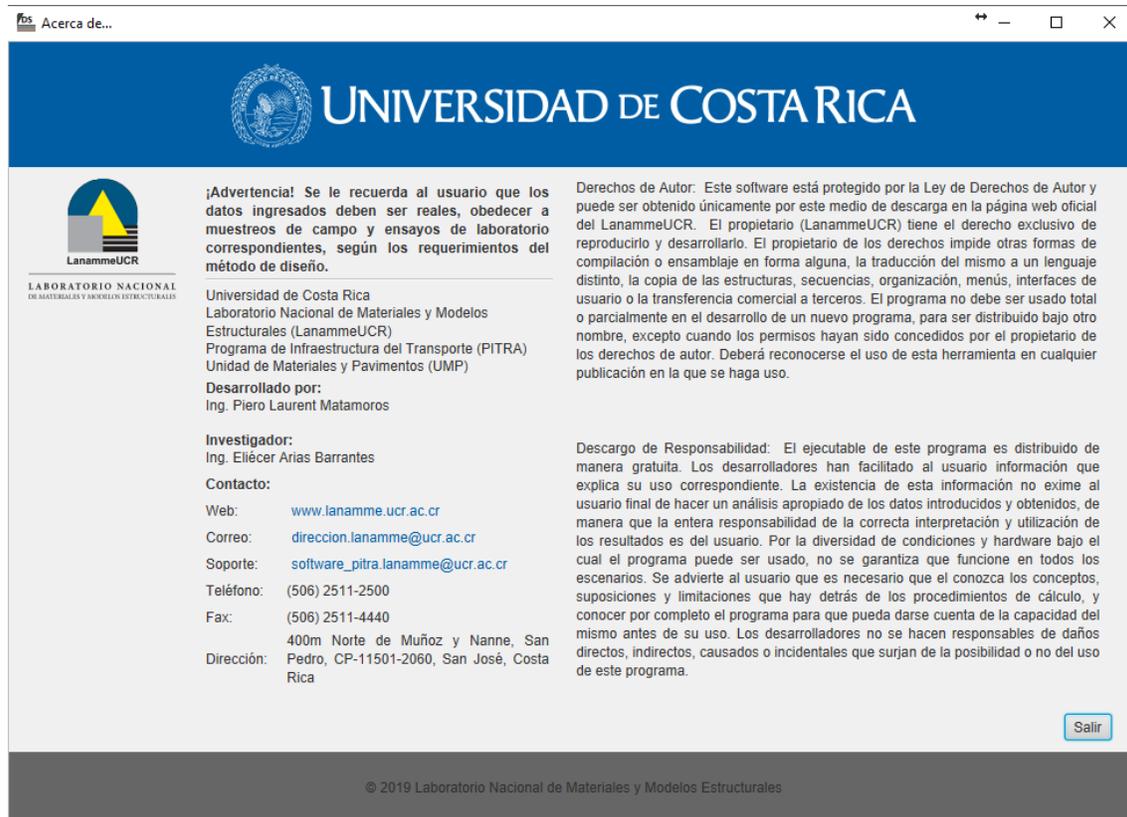


Figura A3-2. Descarga de responsabilidad del software

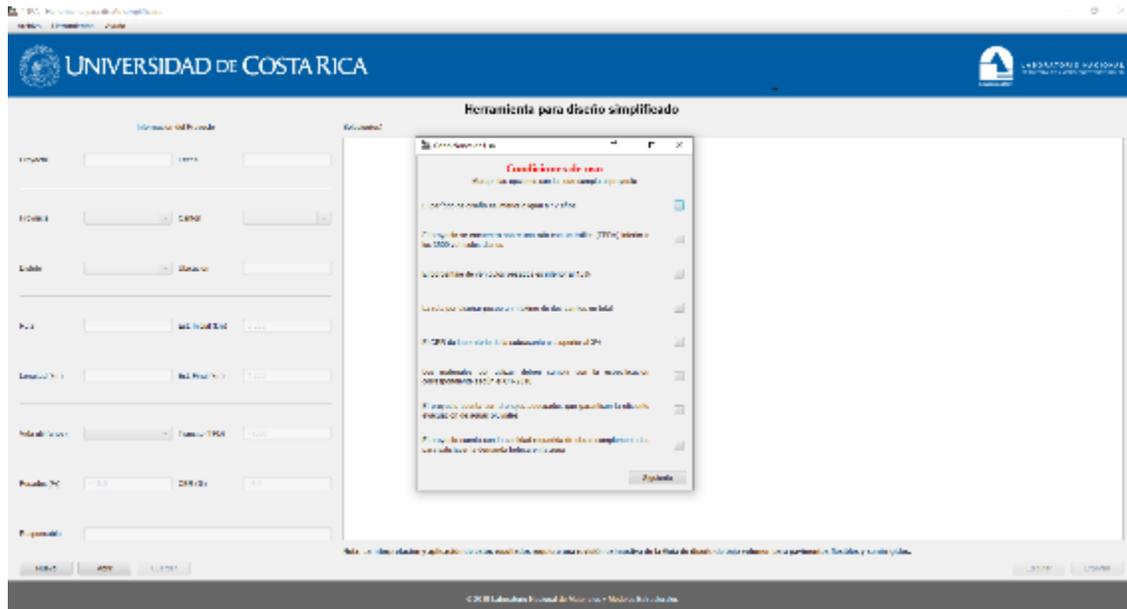


Figura A3-3. Requisitos previos de diseño

