



MINISTERIO DE
OBRAS PÚBLICAS
Y TRANSPORTES

GOBIERNO
DE COSTA RICA

VOLUMEN 4

GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE
PAVIMENTOS PARA COSTA RICA

GDP-2024

TOMO I

GUÍA MECANÍSTICA EMPÍRICA
PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS
FLEXIBLES Y SEMIRRÍGIDOS

2024

PRÓLOGO

Según la Ley de Simplificación y Eficiencia Tributarias N°. 8114 del 4 de julio del 2001 y su Reglamento al artículo 6 de la Ley de Simplificación y Eficiencia Tributaria N°. 8114, Decreto Ejecutivo N°. 37016-MOPT, 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 se establece la actualización del Manual de Especificaciones del MOPT 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).

En lo que respecta al proceso de elaboración y revisión del TOMO I Guía mecánica empírica para el diseño de pavimentos flexibles y semirrígidos, correspondiente al Volumen 4 Guía de diseño estructural de pavimentos para Costa Rica (GDP-2024) del Manual de Especificaciones, se realizó de conformidad con lo establecido en el Capítulo III, Sección III, artículo N°.25, 29 y 38 del Decreto Ejecutivo N°. 37016-MOPT.

Este Tomo I pretende ser una guía para los diferentes diseñadores de pavimentos del país, cuyo objetivo principal es estandarizar los procedimientos realizados a nivel nacional y brindar conceptos modernos, acordes a las prácticas y nivel técnico que existe en el país en cuanto a ensayos de laboratorio y análisis de materiales.

Es de importancia recalcar que, esta guía está sujeta a cambios de requerirse por parte de los profesionales en el área, con el fin de realizar mejoras en concordancia con su quehacer y experiencia en el ámbito.

Ing. Mauricio Batalla Otárola.

Ministro de Obras Públicas y Transporte

TOMO I GUÍA MECANÍSTICA EMPÍRICA PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y SEMIRRÍGIDOS

GDP-2024

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, normativa, capacitación, asistencia técnica, evaluación y auditoría 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 I Guía mecanística empírica para el diseño de pavimentos flexibles y semirrígidos*, correspondiente al *Volumen 4 Guía de diseño estructural de pavimentos para Costa Rica (GDP-2024)* 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 de coordinación:	Ing. Eliécer Arias Barrantes Unidad de Normativa y Actualización Técnica – PITRA, LanammeUCR
Equipo de elaboración:	Ing. Eliécer Arias Barrantes
Equipo de edición:	Ing. Eliécer Arias Barrantes Unidad de Normativa y Actualización Técnica – PITRA, LanammeUCR
Equipo de colaboración:	Asistentes de la Escuela de Ingeniería Civil - UCR

La revisión y aprobación de la guía GDP-2024 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 Proyectos de Actualización del Manual de Especificaciones del MOPT (CRPAME)
---	--

INTRODUCCIÓN

El Volumen 4 del Manual de Especificaciones, denominado Guía de diseño estructural de pavimentos para Costa Rica, GDP-2024, está compuesto por tres tomos:

- Tomo I: Guía mecanística empírica para el diseño de pavimentos flexibles y semirrígidos.
- Tomo II: Guía simplificada para el diseño de pavimentos de bajo volumen de tránsito.
- Tomo III: Guía mecanística empírica para el diseño de pavimentos rígidos.

El presente Tomo I pretende ser una guía para los diferentes diseñadores de pavimentos del país, cuyo objetivo principal es estandarizar los procedimientos realizados a nivel nacional y brindar conceptos modernos, acordes a las prácticas y nivel técnico que existe en el país en cuanto a ensayos de laboratorio y análisis de materiales.

El Tomo I de la Guía de diseño estructural de pavimentos para Costa Rica, se encuentra enfocado en los conceptos modernos aplicables a Costa Rica, los cuales permiten realizar un diseño de pavimentos utilizando componentes mecánicos de la ingeniería de materiales y aplicando modelos de deterioro tendientes a predecir con cierto grado de confiabilidad, los deterioros finales en una estructura de pavimento. Es por este motivo que el concepto expuesto en el presente documento realiza un análisis mixto, de ahí su componente mecanístico y empírico. Adicionalmente, se debe aclarar que este documento pretende aprovechar la experiencia adquirida nacionalmente en la metodología AASHTO de 1993, para crear estructuras preliminares que puedan ser revisadas y validadas, con conceptos más modernos que incorporan componentes calibrados para Costa Rica.

Este tomo, que forma parte del Volumen 4, responde al cumplimiento del artículo N°. 25, 29 y 38 del Reglamento al artículo 6 de la Ley de Simplificación y Eficiencia Tributaria N°. 8114, N°. 37016-MOPT.

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 ya sea de su propia iniciativa o de terceros interesados, 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	ii
TOMO I GUÍA MECANÍSTICA EMPÍRICA PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y SEMIRRÍGIDOS	iii
INTRODUCCIÓN	v
ÍNDICE GENERAL	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
División 100: Características generales de la GDP-2024	3
Sección 101 Generalidades	3
101.01 Abreviaturas	3
101.02 Definiciones	4
Sección 102 Enfoque general de diseño	10
102.01 Alcances y objetivos de la guía de diseño	12
102.02 Visión general	12
102.03 Niveles jerárquicos	16
102.04 Criterios de desempeño y niveles de confiabilidad	17
División 200: Estimación preliminar de espesores	21
Sección 201 Periodos de diseño	21
Sección 202 Ejes equivalentes (ESAL's)	22
202.01 Tránsito promedio diario anual (TPDA)	23
202.02 Factor camión (FC)	27
202.03 Factor de distribución por carril (DL)	28
202.04 Factor de distribución direccional (LDF)	29
202.05 Factor de crecimiento (GF)	29
Sección 203 Índice de serviciabilidad	31

Sección 204	Confiabilidad	31
Sección 205	Módulo resiliente de los materiales para el diseño preliminar	34
Sección 206	Condiciones de drenaje	34
Sección 207	Coeficientes estructurales	36
Sección 208	Cálculo de espesores preliminares	41
División 300:	Diseño de pavimentos Mecanístico Empírico	46
Sección 301	Frecuencia de carga	46
Sección 302	factor de reducción ambiental (FU)	48
302.01	Evapotranspiración	50
302.02	Balance de humedad	55
302.03	Caso 1: Subrasante fina (Suelos)	56
302.04	Caso 2: Subrasante granular (Arenas)	59
Sección 303	Propiedades mecánicas para el diseño mecanístico empírico	60
303.01	Ajuste por temperatura del módulo de la mezcla asfáltica	62
303.02	Módulo resiliente o dinámico para la mezcla asfáltica en caliente (MAC)	64
	<i>303.02.01 Categoría de análisis 3.....</i>	<i>64</i>
	<i>303.02.02 Categoría de análisis 1 y 2</i>	<i>64</i>
303.03	Módulo resiliente para los materiales granulares y suelos	66
	<i>303.03.01 Categoría de análisis 3.....</i>	<i>66</i>
	<i>303.03.02 Categoría de análisis 2</i>	<i>69</i>
	<i>303.03.03 Categoría de análisis 1</i>	<i>70</i>
303.04	Notas adicionales para la subrasante	72
División 400:	Análisis estructural	78
Sección 401	Determinación de los puntos de análisis estructural	79
Sección 402	Daño acumulado y desviación lateral	81
División 500:	Modelos de predicción de desempeño	89
Sección 501	Ahuellamiento	89

501.01 Ahuellamiento en la mezcla asfáltica	90
501.02 Ahuellamiento en materiales granulares	90
501.03 Ahuellamiento en la subrasante	92
Sección 502 Fatiga en mezcla asfáltica	93
502.01 Área agrietada	95
502.02 Grietas longitudinales	95
Sección 503 Fatiga en bases estabilizadas con cemento	96
SECCIÓN 504 Confiabilidad en modelos de desempeño	97
504.01 Ahuellamiento	97
504.02 Área agrietada	97
504.03 Grieta longitudinal	98
Sección 505 Notas sobre la verificación del diseño	99
505.01 Verificación inicial	99
505.02 Iteraciones posteriores	100
Referencias	102
Anexos	106
Anexo A Modelos constitutivos	106
Anexo A.1 Modelos de módulo resiliente para suelos	106
Anexo A.2 Modelos de módulo resiliente para materiales granulares	117
Anexo B Cálculo del TMI y factor de reducción ambiental	119
Anexo B.1 Información para el cálculo del TMI	119
Anexo B.2 Subrasante fina (suelos plásticos)	121
Anexo B.3 Subrasante gruesa (suelos no plásticos)	122
Anexo C: Ejemplos de diseño	124
Anexo C.1 Ejemplo de diseño categoría 3	124
Anexo C.2 Ejemplo de diseño categoría 1	152
Anexo D Evaluación de modelos y Análisis de sensibilidad	237

Anexo D.1	Análisis de sensibilidad modelos de la GDP-2024	237
Anexo D.2	Comparación de predicciones de modelos de ahuellamiento de materiales nacionales vs el modelo de la AASHTOWare ME	256
Anexo E	Recomendaciones generales	264
Anexos E.1	Problemas en suelos	264
Anexos E.2	Recomendaciones para el diseño ME	265

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 102-01 Niveles jerárquicos de diseño según la cantidad de ESAL's	16
Tabla 102-02 Confiabilidad recomendada en función del nivel jerárquico	17
Tabla 102-03 Criterios de desempeño para porcentaje de área agrietada (a la confiabilidad asociada)	18
Tabla 102-04 Criterios de desempeño para grietas longitudinales en el carril de diseño (a la confiabilidad asociada)	18
Tabla 102-05 Criterios de desempeño ahuellamiento total acumulado (a la confiabilidad asociada)	18
Tabla 201-01 Recomendaciones del periodo de análisis según tipo de ruta	21
Tabla 202-01 Categorías de análisis para la variable tráfico	23
Tabla 202-02 Tipos de vehículos y configuración de ejes	23
Tabla 202-03 Factor camión para Costa Rica	28
Tabla 202-04 Recomendaciones para determinar el factor DL según la cantidad de carriles	28
Tabla 202-05 Ejemplo de factores de crecimiento vehicular para distintas rutas del país	30
Tabla 202-06 Determinación de la tasa de crecimiento con base al tipo de análisis	30
Tabla 204-01 Niveles de confiabilidad sugeridos para varias clasificaciones funcionales	32
Tabla 204-02 Valores de desviación normal estándar (ZR) correspondientes a los niveles de confianza seleccionados	32
Tabla 204-03 Niveles de confianza e Índice de Serviciabilidad utilizados en Costa Rica .	33
Tabla 206-01 Definiciones generales de los diferentes niveles de drenaje de la estructura del pavimento	35
Tabla 206-02 Valores recomendados de m para modificar el coeficiente estructural de la capa de base y subbase en pavimentos flexibles	35
Tabla 208-01 Espesores mínimos recomendados	42
Tabla 302-01 Escala de clasificación de zonas por TMI.....	49
Tabla 302-02 Factor de corrección de longitud del día para la latitud norte	52
Tabla 302-03 Factor de corrección de longitud del día para la latitud sur.....	54
Tabla 302-04 Constantes de regresión para el Modelo TM1-P200/wPI	57
Tabla 302-05 Constantes de regresión para el Modelo TM1-P200	59
Tabla 303-01 Valores de CBR mínimos especificados por el CR-2020.....	60
Tabla 303-02 Diseños de mezcla recomendados según categoría de análisis.....	61

Tabla 303-03 Obtención de los módulos de los materiales según el nivel de análisis	62
Tabla 303-04 Ecuaciones de correlación entre el CBR y el módulo resiliente	66
Tabla 303-05 Valores típicos de módulo resiliente para materiales granulares y subrasantes (módulo al contenido óptimo de humedad)	67
Tabla 303-06 Cantidad de ensayos requeridos para caracterizar la subrasante	73
Tabla 402-01 Ejemplo de cálculo para el punto 1 (Ecuación 401-01) de daño tomando en cuenta desviación lateral	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 102-01 Diferencias entre el diseño empírico vs el ME.....	11
Figura 102-02 Esquema metodológico	15
Figura 207-01 Gráfico para estimar el coeficiente estructural de la capa de un concreto asfáltico con graduación densa, basado en el módulo elástico (resiliente).....	37
Figura 207-02 Variación del coeficiente de la base granular (a_2) con varios parámetros de esfuerzo de la base	38
Figura 207-03 Variación del coeficiente de la subbase granular (a_3) con varios parámetros de esfuerzo de la subbase	39
Figura 207-04 Diagrama de números estructurales requeridos.....	40
Figura 301-01 Tiempo de pulsación equivalente del esfuerzo vertical según la velocidad del vehículo y la profundidad (Gráfico de Barksdale).....	47
Figura 301-02 Diagrama de flujo del balance de humedad	65
Figura 401-01 Eje de referencia de puntos críticos	79
Figura 402-01 Esquema del desplazamiento lateral de la carga	83
Figura 402-02 Esquema del desplazamiento lateral de la carga, Posición C	84
Figura 402-03 Esquema del desplazamiento lateral de la carga, Posición A	85
Figura 501-01 Diagrama para determinar el ahuellamiento en materiales granulares y suelos	93

Características
generales de la
GDP-2024

División
100

DIVISIÓN 100: CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA GDP-2024

SECCIÓN 101 GENERALIDADES

El Tomo I de la Guía de Diseño Estructural de Pavimentos para Costa Rica (GDP-2024), presenta los requerimientos y criterios de diseño para estructuras de pavimentos flexibles y semirrígidos.

Los procedimientos y criterios de diseño que se desarrollan en esta Guía permiten obtener estructuras de pavimento flexible o semirrígido que se desempeñen correctamente de acuerdo con las condiciones contempladas.

Para diseñar un pavimento utilizando esta 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, así como las especificaciones mínimas que deben cumplir los materiales de las distintas capas del pavimento.

El objetivo de estos requisitos es contar con la información mínima necesaria para obtener estructuras de pavimento adecuadas, que cumplan con las condiciones especificadas, umbrales de desempeño y lineamientos explicados en este Tomo I Guía Mecánica Empírica para el Diseño de Pavimentos Flexibles y Semirrígidos.

Es de suma importancia tener presente que contar con sistemas de drenaje eficientes y un oportuno mantenimiento, son factores fundamentales para garantizar la durabilidad, seguridad y buen funcionamiento de la estructura de pavimento diseñada, por lo que la Administración deberá velar por que estos elementos sean debidamente considerados a lo largo del ciclo de vida del proyecto.

101.01 Abreviaturas

Cuando se usen abreviaturas en las especificaciones, estas representan lo siguiente:

AASHTO	American Association of State Highways and Transportation Officials
ASTM	American Society for Testing and Materials
CBR	California Bearing Ratio

ESAL	Equivalent Simple Axial Load
FC	Factor Camión
FED	Factor de Expansión Diario
FEH	Factor de Expansión Horario
FEM	Factor de Expansión Mensual
FHWA	Federal Highway Administration
LanammeUCR	Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica
ME	Designa el enfoque mecanístico empírico del diseño estructural de pavimentos.
MOPT	Ministerio de Obras Públicas y Transportes.
MR	Módulo Resiliente.
NAASRA	National Association of Australian State Road Authorities
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
PMS	Project Management System
q_u	Resistencia a la compresión inconfinaada.
SN	Structural Number
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.
TPD	Tránsito Promedio Diario.
TPDA	Tránsito Promedio Diario Anual.
VMA	Voids in the mineral aggregate
VFA	Voids filled with asphalt

101.02 Definiciones

Agregado - Material granular con composición mineralógica que puede ser arena, grava, escoria o roca triturada, con graduación variable. Se define como “fino” a aquel cuyo tamaño máximo pasa por el tamiz de 4,75 mm (N° 4), y como “grueso” a aquel que queda retenido en el tamiz de 4,75 mm (N° 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 circulación - Parte de la calzada destinada al tránsito vehicular en una sola dirección.

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 - Aquella 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 - Dispositivos para captar, dirigir y evacuar el agua de la carretera.

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 tandem - 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 tridem - 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 ligante asfáltico y agua que contiene una pequeña cantidad de agente emulsionante. La emulsión de asfalto puede ser de tipo aniónica (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 de materiales - 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 periodo 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:

- (a) 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.
- (b) Fisicoquímico. Por medio de la adición de cierta cantidad de material estabilizante (cal, cemento, emulsión, entre otros), 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 en caliente, muy bien controlada, de ligante asfáltico (de alta calidad) y agregado bien graduado (también de alta calidad), compactada para formar un capa densa y uniforme todo según especificaciones vigentes.

Rasante - Línea que representa, en proyección vertical, la superficie de carreteras, puentes u otras obras en general y que 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.

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 t (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 t (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 t (toneladas), y un eje trasero simple de dos llantas en cada extremo con un peso máximo de 10 t (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 t (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 t (toneladas) y un eje trasero tándem de dos llantas en cada extremo, con un peso máximo de 16,5 t (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 t (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 t (toneladas) y un eje trasero trídem de dos llantas en cada extremo, con un peso máximo de 23 t (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 t (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 t (toneladas) y un eje trasero tándem de dos llantas, con un peso máximo de 16,5 t (toneladas).

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

SECCIÓN 102 ENFOQUE GENERAL DE DISEÑO

En el presente documento se detalla una opción de diseño y análisis de pavimentos que permite realizar el procedimiento de diseño empírico de la AASHTO de 1993, con los factores más adecuados para Costa Rica y que este sea el punto de partida para realizar una revisión del diseño utilizando propiedades mecánicas de los materiales, como: módulo resiliente, módulo dinámico y variables climáticas; con el fin de utilizar modelos para fatiga y deformación permanente que permitan predecir el desempeño del pavimento a lo largo del periodo de diseño y de ser necesario, realizar un proceso iterativo hasta que la estructura de pavimento, cumpla con los parámetros estipulados de forma optimizada.

Además, se brinda una recopilación de modelos constitutivos para diferentes materiales granulares y finos que se han realizado mediante Trabajos Finales de Graduación (TFG) en la Universidad de Costa Rica, lo que permite contar con una amplia gama de modelos para diferentes condiciones del material. Se recopilan además, los últimos avances realizados por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR), en mecánica de materiales como: software para la generación de curvas maestras, modelos de predicción de módulo dinámico a partir de propiedades de la mezcla asfáltica, modelos de predicción de desempeño para el daño por fatiga en mezclas asfálticas con factores de calibración local para Costa Rica (Arias, 2020); que han sido desarrollados mediante proyectos de investigación del área.

Para poder comprender mejor los aportes de utilizar una guía de diseño que utilice conceptos mecanístico empíricos (ME) se muestra el diagrama de la Figura 102-01 Diferencias entre el diseño empírico vs el ME, en donde se muestran la diferencias entre un método empírico como el de la AASHTO de 1993 y una guía de diseño ME.

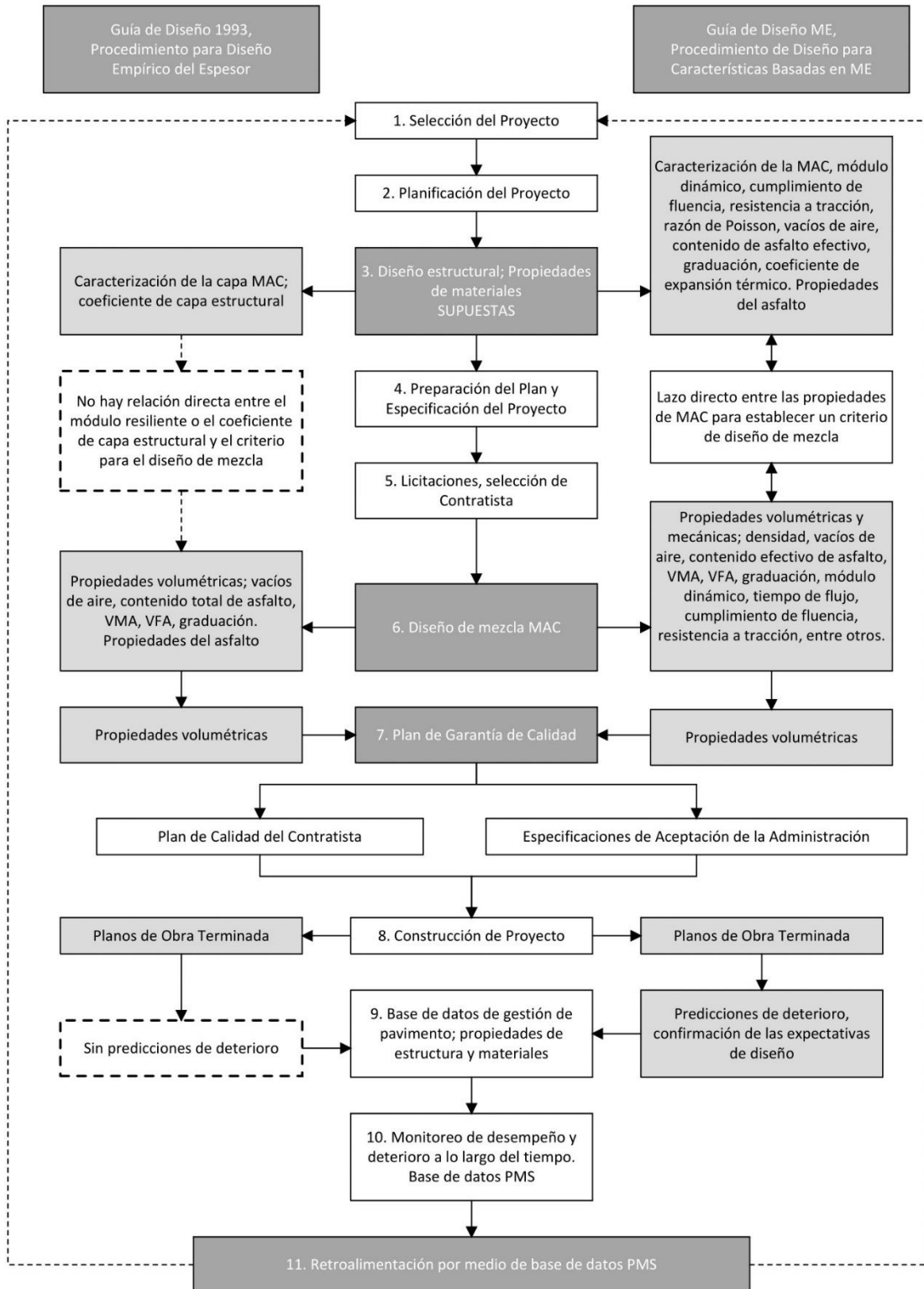


Figura 102-01

Diferencias entre el diseño empírico vs el ME

Adaptado de AASHTOWare, 2015.

102.01 Alcances y objetivos de la guía de diseño

El objetivo de la presente guía es mostrar una propuesta para el diseño de pavimentos flexibles considerando las metodologías de diseño AASHTO 1993, MEPDG-2004, AASHTOWare Pavement ME y los avances realizados en Costa Rica sobre la mecánica de materiales para pavimentos y calibración de modelos de desempeño. El contenido de este Tomo I contempla específicamente el diseño de pavimentos flexibles y semirrígidos; sin embargo, en el Tomo II y Tomo III se abarcan otros tipos de pavimentos, como pavimentos de bajo volumen y pavimentos rígidos.

Los conceptos expuestos son aplicables tanto para pavimentos nuevos como para rehabilitación, y en ambos casos, el criterio y conocimiento del diseñador son aspectos muy importantes para el correcto uso de la guía.

Por lo tanto, este documento pretende ser una guía para los profesionales costarricenses, lo cual no lo exime de la necesidad de contar con criterio ingenieril, principalmente en proyectos que, por sus características particulares, ya sea de carga, clasificación de la ruta, tipo de intervención propuesta, ubicación o geotecnia asociada, entre otras, requieran de soluciones específicas y/o diferentes en concordancia con lo que requiere la Administración.

Los conceptos y criterios expuestos se consideran aplicables al diseño de estructuras de pavimentos para caminos o carreteras; sin embargo, en caso de proyectos que se salgan de esta categorización, y puedan definirse como proyectos especiales, queda a criterio de la Administración definir los lineamientos de análisis y requisitos de diseño por cumplir por parte de los profesionales diseñadores o analistas.

Es importante destacar que las normas técnicas citadas en esta Guía se basan en estándares internacionales. No obstante, es fundamental tener en cuenta las normas INTE en los casos en que exista una homologación oficial correspondiente.

102.02 Visión general

En la Figura 102-02 Esquema metodológico, se presenta el esquema conceptual implementado para realizar diseños de pavimentos, bajo esta propuesta de análisis para pavimentos flexibles y semirrígidos.

La metodología planteada consiste en establecer tres categorías diferentes de análisis, con el propósito de mantener una gradualidad en la rigurosidad técnica, a medida que los

proyectos sean de mayor impacto y cuenten con mayor presupuesto. De igual manera, se brindan recomendaciones sobre la metodología de diseño a utilizar.

La metodología se enfoca en guiar al diseñador hacia la obtención de un diseño inicial, que será la base iterativa para optimizar el diseño con base en criterios mecánicos y propiedades de los materiales.

Posteriormente, se recomiendan ensayos y procedimientos para obtener las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en la estructura del pavimento, manteniendo de igual manera una rigurosidad técnica gradual; utilizando ensayos de mayor precisión en proyectos que económicamente lo ameriten.

A partir de este momento se inicia un proceso iterativo, en el cual se recomienda iniciar con la verificación de los modelos de fatiga, para este proceso y en caso de las Categorías 1 y 2, es necesario realizar una calibración previa de los módulos resilientes de los materiales granulares y de la subrasante, en función del estado de esfuerzos en los materiales a utilizar. Para esto se puede utilizar un software de multicapa elástica o de elemento finito.

Cuando se ha verificado que los módulos de los materiales modelados coinciden con los modelos constitutivos asociados, se pueden obtener los esfuerzos, deflexiones y deformaciones unitarias en los puntos de interés.

Obtenidas las respuestas del paquete estructural es posible utilizar los modelos de fatiga para obtener el daño en la estructura y las funciones de transferencia para estimar el porcentaje de área agrietada y grietas longitudinales en un determinado periodo, se deberá cumplir, como mínimo, con los parámetros que se muestran en la Tabla 102-03 Criterios de desempeño para porcentaje de área agrietada (a la confiabilidad asociada) y Tabla 102-04 Criterios de desempeño para grietas longitudinales en el carril de diseño (a la confiabilidad asociada), en función de la cantidad de ESAL, que a la vez se encuentra relacionada con la magnitud del Proyecto.

De igual forma debe verificarse la deformación permanente acumulada durante el periodo de diseño, esta deformación plástica debe ser calculada en cada una de las diferentes capas del pavimento y la deformación total deberá ser menor a los valores que se muestran en la Tabla 102-05 Criterios de desempeño ahuellamiento total acumulado (a la confiabilidad asociada), con el propósito de mantener la integridad estructural de la vía, brindar un nivel de confort adecuado a los usuarios y minimizar el riesgo de hidropilano en vías de mayor tránsito. En los tres casos anteriores, se deberá incorporar los niveles de

confiabilidad que se muestran en la Tabla 102-02 Confiabilidad recomendada en función del nivel jerárquico.

Si la estructura inicial no cumple con los parámetros establecidos para fatiga y deformación permanente deberá mejorarse la capacidad estructural de la misma, ya sea para corregir problemas de resistencia a la fatiga o deformaciones muy altas.

En este caso, se recomienda realizar un proceso iterativo en el que el espesor de los materiales puede aumentar para mejorar la capacidad estructural o de ser necesario mejorar las propiedades mecánicas de los materiales utilizados, ya sea por estabilización o por sustitución de estos.

El diseño se dará por concluido cuando la estructura y materiales seleccionados cumplan con el criterio a fatiga y por deformación permanente, asegurándose de esta forma que la estructura planteada, cumple con especificaciones mínimas requeridas para el nivel de tráfico estimado y que se han considerado en dicho diseño como, variables climáticas, mecánica de materiales y verificaciones de desempeño acordes con la magnitud del Proyecto. En casos donde exista más de un diseño válido, la selección final deberá justificarse por medio de un análisis de costos y experiencia del diseñador.

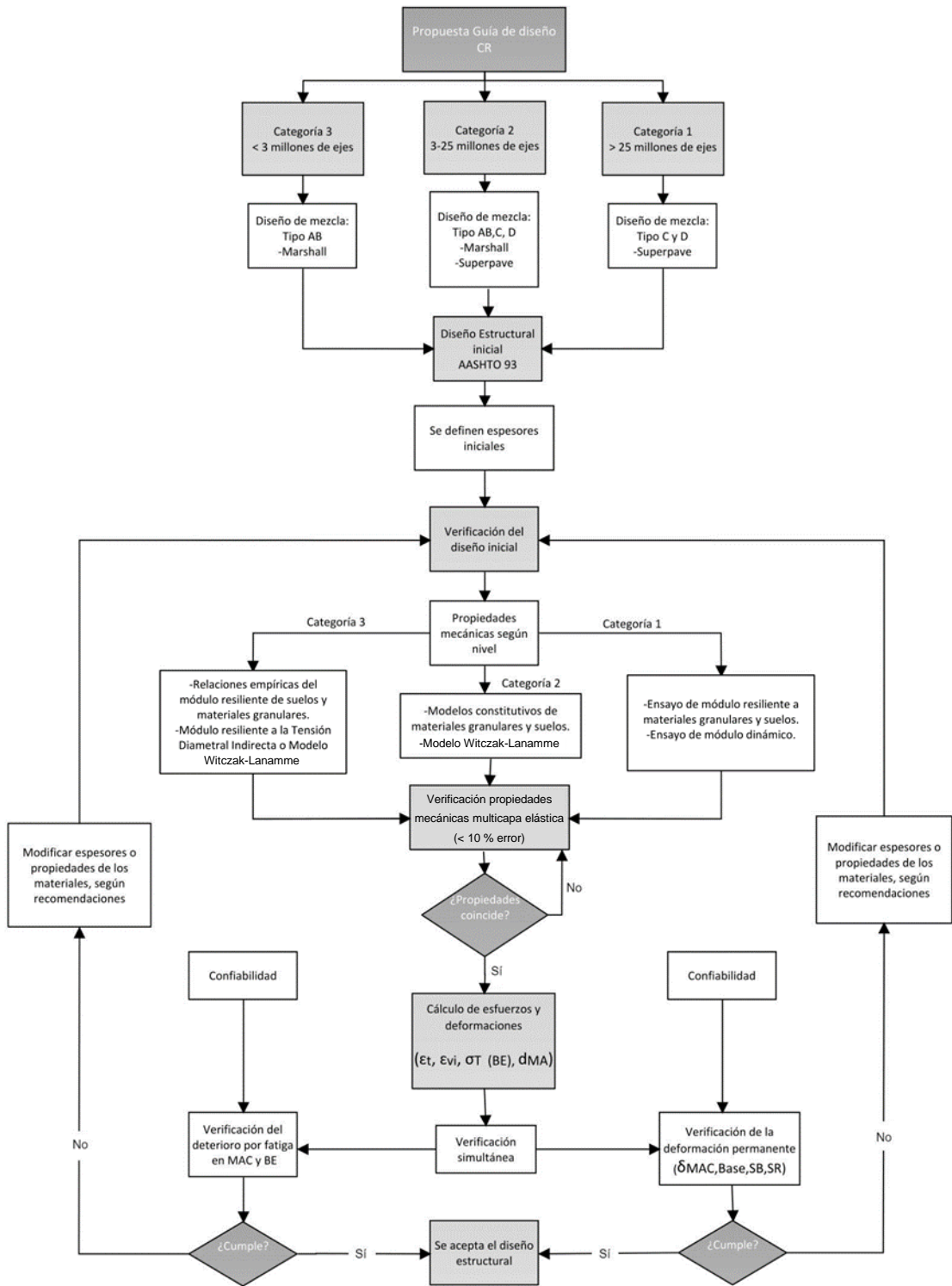


Figura 102-02
Esquema metodológico

102.03 Niveles jerárquicos

Los niveles jerárquicos de diseño permiten identificar los proyectos que deberán contar con un nivel de análisis más profundo, utilizando datos de mayor complejidad técnica. En la siguiente tabla se muestran las jerarquías propuestas, así como la cantidad de ejes equivalentes (ESAL's) de diseño asociados.

Tabla 102-01

Niveles jerárquicos de diseño según la cantidad de ESAL's

Nivel jerárquico	Ejes equivalentes de diseño (ESAL's)
Categoría 3	Menor a 3 millones
Categoría 2	Entre 3 y 25 millones
Categoría 1	Mayor a 25 millones

- (a) Categoría de análisis 3. Esta categoría de análisis permite utilizar valores de referencia, acorde a clasificaciones recomendadas por la AASHTO, SIECA o estudios a nivel nacional, para ponderar las propiedades mecánicas de los materiales, por tipos de suelo, CBR o módulo resiliente. Este nivel de análisis posee los menores costos asociados a ensayos y recolección de datos.

- (b) Categoría de análisis 2. En esta categoría se permite el uso de datos de entrada obtenidos a través de correlaciones, modelaciones o modelos de regresión a partir de datos nacionales, lo cuales podrían ser similares a otras regiones. A modo de ejemplo se tiene, curvas maestras características y modelos constitutivos nacionales. (Anexo A Modelos Constitutivos y Anexo B Cálculo del TMI y Factor de Reducción Ambiental)

- (c) Categoría de análisis 1. Se recomienda en este nivel de análisis que se utilicen datos de entrada locales para el Proyecto, obtenidos a través de ensayos y mediciones directas en el sitio del Proyecto. Se recomienda que se evalúen todos los materiales a ser utilizados en el Proyecto. Es por este motivo que esta categoría de análisis requiere el mayor nivel de conocimiento posible sobre los parámetros de entrada.

102.04 Criterios de desempeño y niveles de confiabilidad

La presente guía de diseño contempla varios criterios de desempeño a tomar en cuenta, los cuales son explicados en las divisiones posteriores. Adicionalmente, se incorpora un análisis por confiabilidad para disminuir el grado de error asociado a los modelos de deterioro y funciones de transferencia. En la Tabla 102-02 Confiabilidad recomendada en función del nivel jerárquico, se muestra la confiabilidad recomendada asociada a cada categoría de tráfico vehicular del Proyecto.

Tabla 102-02

Confiabilidad recomendada en función del nivel jerárquico

Ejes equivalentes periodo de diseño	Confiabilidad típica	Intervalo
< 3 millones	75 %	50 % - 85 %
3 - 25 millones	85 %	85 % - 95 %
> 25 millones	95 %	85 % - 99,9 %

Como se mencionó en líneas anteriores, la presente guía de diseño contempla una revisión de diferentes deterioros (predichos) al final del periodo de diseño; esto con el objetivo de garantizar que el Proyecto cumple con requisitos mínimos de calidad y condiciones adecuadas para mantener la integridad de la estructura de pavimento diseñada. Los criterios de desempeño son los siguientes.

- Porcentaje de área agrietada en el carril de diseño.
- Longitud de grietas longitudinales.
- Ahuellamiento total acumulado.

Cada uno de estos deterioros se encuentran asociados a un tipo de daño, que aumenta en el tiempo, conforme los vehículos pasan por la carretera; por lo tanto, cada diseñador podrá hacer las respectivas modelaciones para hallar en qué año se llega a un nivel de deterioro dado y así tomar las medidas del caso.

En las tablas siguientes se muestra el valor máximo permitido recomendado, para garantizar condiciones mínimas de calidad y nivel de servicio. Es importante aclarar que estos valores son máximos recomendados, esto quiere decir, que el diseño deberá arrojar valores inferiores para los tres deterioros y cumplir con el nivel de confiabilidad de la Tabla 102-02 Confiabilidad recomendada en función del nivel jerárquico.

Es obligación de cada diseñador mostrar el cumplimiento de dichos umbrales y demostrar que incorporó la confiabilidad mínima requerida.

Tabla 102-03

*Criterios de desempeño para porcentaje de área agrietada
(a la confiabilidad asociada)*

Ejes equivalentes periodo de diseño	Porcentaje de área agrietada antes de la falla (FC_{B-U-P})
< 3 millones	35 %
3 - 25 millones	20 %
> 25 millones	10 %

Tabla 102-04

*Criterios de desempeño para grietas longitudinales en el carril de diseño
(a la confiabilidad asociada)*

Ejes equivalentes periodo de diseño	Longitud de grietas antes de la falla (m/km) ($FC_{Top-D-P}$)	Longitud de grietas antes de la falla (ft/milla) ($FC_{Top-D-P}$)
< 3 millones	380	2000
3 - 25 millones	380	2000
> 25 millones	284	1500

Tabla 102-05

*Criterios de desempeño ahuellamiento total acumulado
(a la confiabilidad asociada)*

Ejes equivalentes periodo de diseño	Ahuellamiento total permisible máximo
< 3 millones	16 mm (0,65 in)
3 - 25 millones	12 mm (0,5 in)
> 25 millones	10 mm (0,4 in)

Estimación
preliminar de
espesores

División

200

DIVISIÓN 200: ESTIMACIÓN PRELIMINAR DE ESPEORES

La estimación inicial de la estructura del pavimento se realiza por medio de la metodología de diseño AASHTO-93, la cual se considera válida para determinar el flujo vehicular, módulos y espesores “semilla” o iniciales. La estructura resultante de este diseño se utiliza para verificar los niveles de deterioro admisibles, tanto para fatiga como para deformación permanente. Si no se cumplen las especificaciones requeridas, se deben realizar ajustes de espesores y/o materiales.

Los componentes y procedimiento de diseño de pavimentos AASHTO-93 se describen en las siguientes secciones.

SECCIÓN 201 PERIODOS DE DISEÑO

Se refiere al periodo de tiempo en que se va a desarrollar el análisis del pavimento o vida útil del mismo. La AASHTO recomienda periodos de análisis según el tipo de ruta que se está diseñando, las recomendaciones se muestran en la Tabla 202-01 Recomendaciones del periodo de análisis según tipo de ruta.

Tabla 201-01

Recomendaciones del periodo de análisis según tipo de ruta

Condiciones de la ruta	Periodo de análisis (años)
Autopistas	20 - 40
Arterias	15 - 30
Colectoras	10 - 20
Pavimentada de bajo volumen	8 - 15
Superficie de agregados de bajo volumen	5 - 8

Modificado de AASHTO 93, SIECA y LM-PI-GM-INF-22-2014

Los periodos de diseño comunes para el análisis de pavimentos flexibles en Costa Rica son de entre 10 años a 20 años; por lo tanto, para este parámetro se pueden seguir las recomendaciones de la Tabla 201-01 Recomendaciones del periodo de análisis según tipo de ruta, u otro periodo de diseño, siempre y cuando esté debidamente justificado por el diseñador y acorde a lineamientos aprobados por la Administración. Se considera que al

final de este periodo la estructura del pavimento alcanza un nivel de serviciabilidad inaceptable para el usuario.

SECCIÓN 202 EJES EQUIVALENTES (ESAL'S)

Los ejes equivalentes de diseño son una ponderación de la cantidad de vehículos totales que pasarán por una determinada carretera, transformando los diferentes tipos de vehículo a una carga y eje estándar, el cual es un eje simple dual de 80 kN; esto permite estandarizar los análisis y poder comparar diferentes rutas y diseño. Se recomienda que en la presente guía el valor estandarizado de ESAL, sea utilizado tanto para el diseño preliminar por AASHTO-93, como para la verificación Mecánica Empírica.

Actualmente, es posible utilizar otros conceptos como “Espectro de carga” y “Espectro de daño para el diseño Mecánico”; sin embargo, se considera que aún es necesario recopilar más información a nivel nacional, para que ambos conceptos puedan ser llevados a la práctica de forma estandarizada. Por lo tanto, para esta edición se recomienda trabajar con el concepto de ESAL, manteniendo la gradualidad asociada a la categoría para los datos utilizados en las estimaciones.

Para estimar la cantidad de ejes equivalentes de diseño se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$ESAL_{día} = \% \text{ pesados} * TPDA * FC \quad \text{Ec. 202-01}$$

$$ESAL_{diseño} = ESAL_{día} * 365 * GF * DL * LDF \quad \text{Ec. 202-02}$$

Donde,

- $TPDA$ = Tránsito promedio diario anual.
- FC = Factor camión.
- GF = Factor de crecimiento para un determinado periodo de años.
- DL = Factor de distribución por carril.
- LDF = Factor de distribución direccional.

En la Tabla 202-01 Categorías de análisis para la variable tráfico, se muestran recomendaciones sobre el tipo de valores a utilizar en función de la categoría del Proyecto para las principales variables requeridas.

Tabla 202-01

Categorías de análisis para la variable tráfico

Categoría	TPDA	FC	GF
Categoría 3	Conteos vehiculares	Característicos locales	Característicos locales
Categoría 2	Conteos vehiculares	Característicos locales	Característicos locales
Categoría 1	Estudio de tráfico propio del Proyecto	Estudio de tráfico propio del Proyecto	Estudio de tráfico propio del Proyecto

En las siguientes secciones se explican los diferentes componentes asociados a la determinación de los ejes equivalentes.

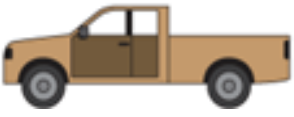
202.01 Tránsito promedio diario anual (TPDA)

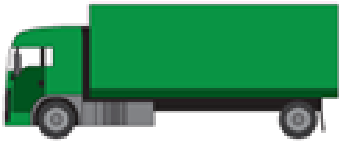











El tránsito promedio diario anual o TPDA permite estimar las cargas vehiculares a las que estará expuesta la estructura de pavimento durante el periodo de diseño. El TPDA es la cantidad promedio anual de vehículos que transitan por una vía (en ambos sentidos) y se obtiene por medio de conteos vehiculares.

El TPDA debe especificarse por tipo de vehículo (clasificado), para aplicar el factor camión (FC) correspondiente y así estimar los ejes equivalentes de diseño. Los tipos de vehículo que se consideran en la clasificación del TPDA se presentan en la Tabla 202-02 Tipos de vehículo y configuración de ejes, estos tipos de vehículos están asociados a los FC medidos en Costa Rica.

Tabla 202-02

Tipos de vehículos y configuración de ejes

Tipo	Configuración del vehículo	Configuración de ejes
<i>Pickup</i>		I I

Tipo	Configuración del vehículo	Configuración de ejes
C2+		
C2		
Bus C2		
C3		
T3-S2		
T3-S3		

De una forma más general, el TPDA puede estimarse de acuerdo con la Ecuación 202-03, en donde se parte de un valor de TPD (tránsito promedio diario) y utiliza factores de expansión adecuados.

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

Ec. 202-03

Donde,

$TPDA =$	Tránsito promedio diario anual.
$TPD \text{ día } i, \text{ mes } k =$	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”.
$FED_i =$	Factor de expansión diario para un día “i”.
$FEM_k =$	Factor de expansión mensual para un mes “k”.

Cada uno de los componentes requeridos para el cálculo del TPDA se explican a continuación:

- (a) Transito Promedio Diario (TPD). La cantidad de vehículos en un periodo de 24 horas que circula por una carretera es lo que se conoce como Tránsito Promedio Diario, dicho valor constituye el principal insumo para calcular el TPDA.

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

- Realizar los conteos durante periodos de tránsito normal, evitar realizar los conteos 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 o realizar conteos que abarquen la semana completa.
- 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 tránsito promedio anual (TPDA).
- Seleccionar 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 del comportamiento del tránsito y que las estimaciones de TPDA mediante el uso de FED sean más precisas.

Debido a la alta tasa de cambio que poseen el tipo y el volumen de tránsito vehicular, se recomienda realizar los conteos de manera periódica, aproximadamente cada año o máximo cada dos años. Esto es 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.

- (b) Factor de expansión horario (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 (Garber & Hoel, 2006).

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 202-04.

$$FEH = \frac{\text{Volumen total para un periodo de 24 horas}}{\text{Volumen para una hora específica}} \quad \text{Ec. 202-04}$$

- (c) Factor de expansión diario (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 en las que 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:

$$FED_{"i"} = \frac{\text{Volumen promedio para un día "i"}}{\text{Volumen total promedio de la semana}} \quad \text{Ec. 202-05}$$

- (d) Factor de expansión 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 nacional, que se obtienen mediante cálculos de conteos anuales completos.

Para calcular el FEM se utiliza la siguiente expresión:

$$FEM_k = \frac{TPD_{\text{mes "k"}}}{TPDA} \quad \text{Ec. 202-06}$$

202.02 Factor camión (FC)

El factor camión se utiliza en conjunto con el tránsito promedio diario anual (TPDA) de la ruta. Los factores camión (FC) permiten conocer el daño que los ejes de cada vehículo le generan al pavimento, y corresponden a la suma de los factores de equivalencia de carga LEF (*Load Equivalency Factors*) de cada vehículo.

$$FC \text{ promedio} = \frac{[\sum(\text{Número de ejes} * LEF)]}{\text{Número de vehículos encuestados}} \quad \text{Ec. 202-07}$$

Donde,

LEF = Factores equivalentes de carga (definidos en la guía de diseño AASHTO-93). De tal manera, se puede determinar la cantidad de ejes equivalentes de carga de 80 kN que deberá soportar en total una determinada estructura de pavimento, para todos sus años de servicio.

Actualmente, se cuenta con información de factores camión para diferentes periodos (2007, 2009, 2008-2017); en la Tabla 202-03 Factor camión para Costa Rica, se pueden observar factores camión que han sido calculados por medio de distintos proyectos de investigación para diferentes niveles de confiabilidad, cada uno de ellos posee un esquema de análisis y el detalle puede ser consultado en cada proyecto individual. En resumen, la Tabla 202-03 Factor camión para Costa Rica, incluye, factores camión calculados en el 2007 por medio de una encuesta de carga realizada por el LanammeUCR (Allen, Ulloa, Sibaja, & Badilla, 2007); también, se brinda una recopilación de factores camión de las bases de datos de la Dirección de Planificación Sectorial del MOPT (Vargas & Allen, 2014) y de un proyecto final de graduación realizado en conjunto con el LanammeUCR (Espinoza, 2013) sobre los factores camión de los buses urbanos e interurbanos. Los factores camión que se presentan se encuentran calculados con los LEF de pavimentos flexibles, por lo tanto, el cálculo de ejes equivalentes de diseño utilizando dichos LEF, sólo aplica para proyectos con pavimentos flexibles o semirrígidos.

Tabla 202-03

Factor camión para Costa Rica

Factores camión histórico 2007 - 2017 para diferentes niveles de confiabilidad					
Vehículo	80 %	85 %	90 %	95 %	99 %
Pickup	0,0131	0,0133	0,0137	0,0142	0,0151
C2	0,360	0,400	0,451	0,527	0,670
Bus C2	2,559	2,730	2,954	3,281	3,893
C2+	0,093	0,107	0,126	0,154	0,205
C3	1,250	1,414	1,621	1,928	2,504
C4	1,123	1,193	1,282	1,413	1,659
T3-S2	1,920	2,098	2,321	2,652	3,273
T3-S3	2,142	2,230	2,341	2,506	2,815

Adaptado de Allen, Arias, & Vargas, 2020.

202.03 Factor de distribución por carril (DL)

Este factor es expresado como porcentaje y se utiliza cuando dos o más carriles están habilitados en una dirección. Para el caso de un carril por sentido el factor de distribución por carril tiene un valor de 1. En la Tabla 202-04 Recomendaciones para determinar el factor DL según la cantidad de carriles, se presenta el valor recomendado del factor de distribución según el número de carriles de la carretera; sin embargo, para la categoría 1 de análisis este valor deberá ser justificado con un estudio de tráfico.

Tabla 202-04

Recomendaciones para determinar el factor DL según la cantidad de carriles

Número de carriles en cada dirección	Porcentaje de ESAL's en cada carril
1	100
2	80 – 100
3	60 – 80
4	50 - 75

Adaptado de AASHTO, 1993.

202.04 Factor de distribución direccional (LDF)

Este factor es expresado como porcentaje y se utiliza para distribuir los ESAL's por dirección. El valor más común para vías de dos carriles es 0,5, bajo el supuesto de que la misma cantidad de vehículos transitan en ambas direcciones; sin embargo, dicho dato debe verificarse siempre en campo a través de conteos vehiculares o con otra metodología que permita estimar la atracción y generación de viajes en cada dirección. Se recomienda que en las tres categorías de análisis este valor sea justificado con datos de conteos vehiculares.

En los casos que no sea viable realizar conteos vehiculares por las características del proyecto, se puede tomar como referencia lo establecido en las Tabla 3.21 Factor de distribución por dirección y Tabla 3.22 Factor de distribución por carril, de los apartados 3.4 Factor de distribución por dirección y 3.5 Factor de distribución por carril, respectivamente del Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos (SIECA, 2002) o su versión vigente.

202.05 Factor de crecimiento (GF)

El factor de crecimiento depende del periodo de diseño determinado y de la tasa de crecimiento del tránsito de cada Proyecto, de forma general se puede estimar a partir de la siguiente ecuación:

$$GF = \frac{|(1 + r)^n - 1|}{r} \quad \text{Ec. 202-08}$$

Donde,

- GF = Factor de crecimiento.
- r = Porcentaje de crecimiento anual, decimal.
- n = Cantidad de años (periodo de diseño).

Se sugiere seguir las recomendaciones de la Tabla 202-01 Categorías de análisis para la variable tráfico, en cuanto al origen de los datos; además, se recomienda que en el caso de las categorías 3 y 2 se utilice un histórico de al menos 10 años.

La curva de crecimiento del tránsito presenta una forma de curva logística, donde en los primeros años el tránsito crece lentamente, luego presenta un crecimiento más notorio y a medida que se acerca a la capacidad máxima de la carretera el crecimiento es asintótico.

La metodología AASHTO-93 simplifica el crecimiento vehicular asumiendo una tasa de crecimiento constante durante el periodo de diseño. En la Tabla 202-05 Ejemplo de factores de crecimiento vehicular para distintas rutas de Costa Rica, se presentan porcentajes de crecimiento observados para distintas rutas del país en diferentes periodos; estos valores se muestran con fines informativos, ya que para cada Proyecto debe utilizarse el factor de crecimiento acorde a las características propias de cada sitio.

Tabla 202-05

Ejemplo de factores de crecimiento vehicular para distintas rutas de Costa Rica

Ruta	Años de análisis	Periodo	Porcentaje de Crecimiento
Bernardo Soto, Ruta 1	9	1996 - 2010	6,4 %
Florencio del Castillo, Ruta 2	16	1994 - 2010	5,9 %
Próspero Fernández, Ruta 27	12	1996 - 2007	10,9 %
Braulio Carrillo, Ruta 32	12	1999 - 2010	5,9 %

Para determinar los factores de crecimiento se recomienda realizar estudios específicos de tránsito para el Proyecto, en función de la importancia de este. Para dichos estudios puede revisarse el historial de conteos vehiculares de los lugares cercanos o en rutas con un comportamiento similar a la nueva carretera, así como incorporar variables socioeconómicas de la zona. En función de la importancia del Proyecto se sugiere seguir las recomendaciones de la siguiente tabla.

Tabla 202-06

Determinación de la tasa de crecimiento con base al tipo de análisis

Categoría	Tipo de análisis
Categoría 3	Porcentaje de crecimiento típicos
Categoría 2	Porcentaje de crecimiento típicos con base en históricos de la ruta
Categoría 1	Porcentaje de crecimiento con base en un estudio de tráfico formal

SECCIÓN 203 ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD

La serviciabilidad de un pavimento se define como la condición necesaria para proveer a los usuarios un manejo seguro y confortable. Este índice permite considerar el confort de los usuarios al transitar la carretera durante su vida útil. Varía de 0, cuando la carretera es intransitable, hasta un valor de 5 que representa una carretera en perfecto estado, (condición hipotética).

El Índice de Serviciabilidad inicial (P_o) depende del diseño y la construcción de la carretera, el valor común para pavimentos flexibles es de 4,2. El Índice de Serviciabilidad final (P_t) se basa en el menor índice tolerable por los usuarios; normalmente se considera de 2,5 o mayor para altos volúmenes de tráfico y de 2 para tránsito bajo.

Este factor es representativo de la condición de falla según el criterio de la AASHTO-93; y es el índice aceptable antes de que se tenga que intervenir la estructura; ya sea con una rehabilitación, recarpeteo o reconstrucción (en la Tabla 204-03 Niveles de confianza e Índice de Serviciabilidad utilizados en Costa Rica, se detallan más valores).

La siguiente ecuación se aplica para definir el cambio total en el Índice de Serviciabilidad (ΔPSI):

$$\Delta PSI = P_o - P_t \quad \text{Ec. 203-01}$$

SECCIÓN 204 CONFIABILIDAD

Es la probabilidad de que el pavimento soporte el periodo de diseño con una serviciabilidad mayor o igual a la final. El nivel de confianza (del diseño preliminar) asegura que el pavimento se desempeñará según se diseñó, dada la variabilidad de la construcción, del tránsito, de los materiales y del clima que inciden en el desempeño de la estructura. En la Tabla 204-01 Niveles de confiabilidad sugeridos para varias clasificaciones funcionales y Tabla 204-02 Valores de desviación normal estándar (Z_R), correspondientes a los niveles de confianza seleccionados se muestran los valores recomendados por la AASHTO.

Tabla 204-01

Niveles de confiabilidad sugeridos para varias clasificaciones funcionales

Clasificación funcional	Nivel de confianza recomendado	
	Urbano	Rural
Autopistas	85 – 99,9	80 – 99,9
Arterias	80 - 99	75 - 95
Colectoras	80 - 95	75 - 95
Pavimentada de bajo volumen o Superficie de agregados de bajo volumen	50 - 80	50 - 80

Adaptado de AASHTO, 1993.

El nivel de confianza está compuesto por dos variables, la desviación normal estándar (Z_R) y la desviación estándar global (S_o). En la Tabla 204-02 Valores de desviación normal estándar (Z_R) correspondientes a los niveles de confianza seleccionados, se presentan valores de desviación estándar normal según los niveles de confianza mostrados en la Tabla 204-01 Niveles de confiabilidad sugeridos para varias clasificaciones funcionales y/o Tabla 204-03 Niveles de confianza e Índice de Serviciabilidad utilizados en Costa Rica.

Tabla 204-02

*Valores de desviación normal estándar (Z_R)
correspondientes a los niveles de confianza seleccionados*

Confiabilidad, R (%)	Desviación normal estándar, Z_R
50	-0,00
60	-0,253
70	-0,524
75	-0,674
80	-0,841
85	-1,037
90	-1,282
91	-1,340

Confiabilidad, R (%)	Desviación normal estándar, Z _R
92	-1,405
93	-1,476
94	-1,555
95	-1,645
96	-1,751
97	-1,881
98	-2,054
99	-2,327
99,9	-3,090
99,99	-3,750

Adaptado de AASHTO, 1993.

La desviación estándar S_o , es la desviación debido al error de proyecciones de tránsito y al desempeño del pavimento. Entre mayor sean las desviaciones de las estimaciones mayor debe ser el valor de S_o . Para pavimentos flexibles se recomienda valores de S_o entre 0,4 y 0,5. Con un valor recomendado de 0,45 se considera que no existirá mucha variación en las estimaciones de tráfico realizadas, o sea, que las estimaciones de demanda de tráfico poseen poco margen de error. Debe considerarse que, si se espera una variación muy alta en el tránsito futuro, el S_o podría ser de hasta 0,49.

En la siguiente tabla se muestran algunos lineamientos utilizados en Costa Rica por parte del Ministerio de Obras Públicas y Transportes para el nivel de confianza y el Índice de Serviciabilidad.

Tabla 204-03

Niveles de confianza e Índice de Serviciabilidad utilizados en Costa Rica

Zona	TPDA	Nivel de confianza (%)	Índice de Serviciabilidad
Ruta Primaria	Menor a 500	75	2,0
	Entre 500 y 2000	85	2,5
	Mayor a 2000	90	2,5
Ruta	Menor a 500	70	2,0

Zona	TPDA	Nivel de confianza (%)	Índice de Serviciabilidad
Secundaria	Entre 500 a 2000	80	2,0
	Mayor a 2000	85	2,5
Ruta Terciaria	Menor a 500	70	2,0
	Entre 500 y 2000	75	2,0
	Mayor a 2000	80	2,0

Adaptado de DVOP-5170-07, 2007.

SECCIÓN 205 MÓDULO RESILIENTE DE LOS MATERIALES PARA EL DISEÑO PRELIMINAR

Las propiedades mecánicas de los materiales granulares se representan con el módulo resiliente. Para el diseño preliminar de AASHTO-93 se utiliza una correlación del módulo resiliente con el valor de capacidad de soporte CBR para cada material, este dato puede obtenerse a través de ensayos de laboratorio y deben cumplir con el mínimo establecido por el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes, CR-2020 en su versión vigente.

Nota: En esta etapa de diseño inicial se asumirá como válido un coeficiente estructural de capa a_1 para la mezcla asfáltica de 0,45 (como máximo), para todos los diseños de pavimento, dado que esta metodología AASHTO-93 no considera cómo varía este módulo con la frecuencia de carga y aumento de temperatura. En posteriores análisis se observará cómo varía este módulo considerando frecuencia de carga y temperatura del pavimento, y que incluso para condiciones de velocidad media (< 60 km/h) y temperaturas intermedias del pavimento para Costa Rica (35 °C – 40 °C) se observará cómo el valor de módulo resiliente varía considerablemente.

SECCIÓN 206 CONDICIONES DE DRENAJE

Este apartado considera los efectos del drenaje en la predicción del desempeño de la estructura del pavimento. El efecto se considera en la variación del coeficiente estructural de los materiales granulares que componen la estructura, bases sin tratar y subbases. En la ecuación del Número Estructural, Ecuación 208-01, se utiliza un factor de drenaje “m”, el cual modifica los coeficientes estructurales.

El factor de drenaje depende de la calidad del drenaje y la exposición de la estructura a condiciones de humedad. La calidad del drenaje depende del periodo de tiempo en que el pavimento permanece en condiciones saturadas y se determina según los valores de la

Tabla 206-01 Definiciones generales de los diferentes niveles de drenaje de la estructura del pavimento.

Tabla 206-01

Definiciones generales de los diferentes niveles de drenaje de la estructura del pavimento

Calidad del drenaje	Tiempo que tarda el agua en drenar
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Regular	1 semana
Pobre	1 mes
Muy Pobre	Agua no es drenada

Adaptado de AASHTO, 1993.

Establecida la calidad de drenaje, el diseñador debe estimar el porcentaje de tiempo en el año que el pavimento estará expuesto a condiciones de saturación, según las condiciones climáticas de la región del Proyecto. En la Tabla 206-02 Valores recomendados de *m* para modificar el coeficiente estructural de la capa de base y subbase en pavimentos flexibles, se presentan valores recomendados del coeficiente de drenaje para distintas condiciones.

Tabla 206-02

Valores recomendados de m para modificar el coeficiente estructural de la capa de base y subbase en pavimentos flexibles

Calidad del drenaje	Porcentaje de tiempo en que la estructura del pavimento se encuentra expuesta a niveles de humedad de saturación			
	Menos de 1 %	1 – 5 %	5 – 25 %	Más del 25 %
Excelente	1,40 – 1,35	1,35 – 1,30	1,30 – 1,20	1,20
Bueno	1,35 – 1,25	1,25 – 1,15	1,15 – 1,00	1,00
Regular	1,25 – 1,15	1,15 – 1,05	1,00 – 0,80	0,80
Pobre	1,15 – 1,05	1,05 – 0,80	0,80 – 0,60	0,60
Muy Pobre	1,05 – 0,95	0,95 – 0,75	0,75 – 0,40	0,40

Adaptado de AASHTO, 1993.

SECCIÓN 207 COEFICIENTES ESTRUCTURALES

El coeficiente estructural expresa la relación empírica entre el Número Estructural (SN) y los espesores de las capas, es una medida de la capacidad del material como componente estructural en el pavimento. El valor de SN es un valor adimensional que expresa la capacidad requerida en una ruta, es decir, un valor de SN mayor implicará un paquete estructural de mayor espesor respecto a un SN menor.

Por su parte el valor de coeficiente estructural corresponde al aporte de cada material por cada pulgada al SN requerido. Es por este motivo que debe asignarse un coeficiente estructural a cada capa de la estructura del pavimento, para transformar los espesores en un SN. La ecuación general del SN es la siguiente:

$$SN = \sum_{i=1} a_i D_i \quad \text{Ec. 207-01}$$

Donde,

- $D_i =$ Espesor en pulgadas de la capa i .
- $a_i =$ Coeficiente estructural para el material de la capa i .

El coeficiente estructural de la capa asfáltica depende de su módulo resiliente. La Figura 207-01 Gráfico para estimar el coeficiente estructural de la capa de un concreto asfáltico con graduación densa, basado en el módulo elástico (resiliente), muestra la relación entre el módulo resiliente y el coeficiente estructural de la mezcla asfáltica. Como se explicó en la Sección 205 Módulo resiliente de los materiales para el diseño preliminar, para esta etapa se recomienda considerar un módulo estándar de 3100 MPa a 20 °C (450000 psi) para todas las mezclas asfálticas, ya que este diseño AASHTO-93 es preliminar y permite encontrar los espesores iniciales a revisar.

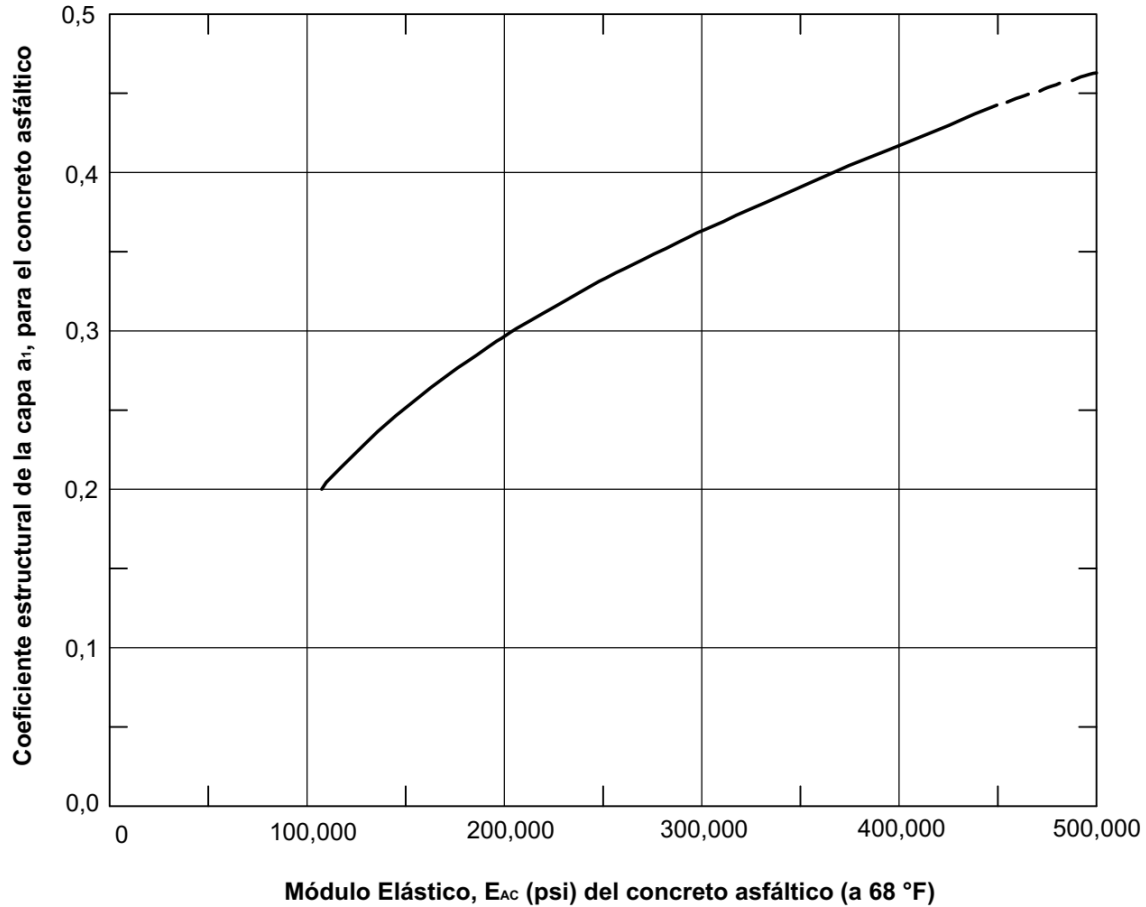


Figura 207-01

Gráfico para estimar el coeficiente estructural de la capa de un concreto asfáltico con graduación densa, basado en el módulo elástico (resiliente)

Adaptado de AASHTO, 1993.

Para los materiales granulares la estimación del coeficiente estructural se realiza con el valor de CBR de laboratorio. El nomograma que correlaciona estas variables se muestra en la Figura 207-02 Variación del coeficiente de la base granular (a_2) con varios parámetros de esfuerzo de la base, para bases y en la Figura 207-03 Variación del coeficiente de la subbase granular (a_3) con varios parámetros de esfuerzo de la subbase, para subbases.

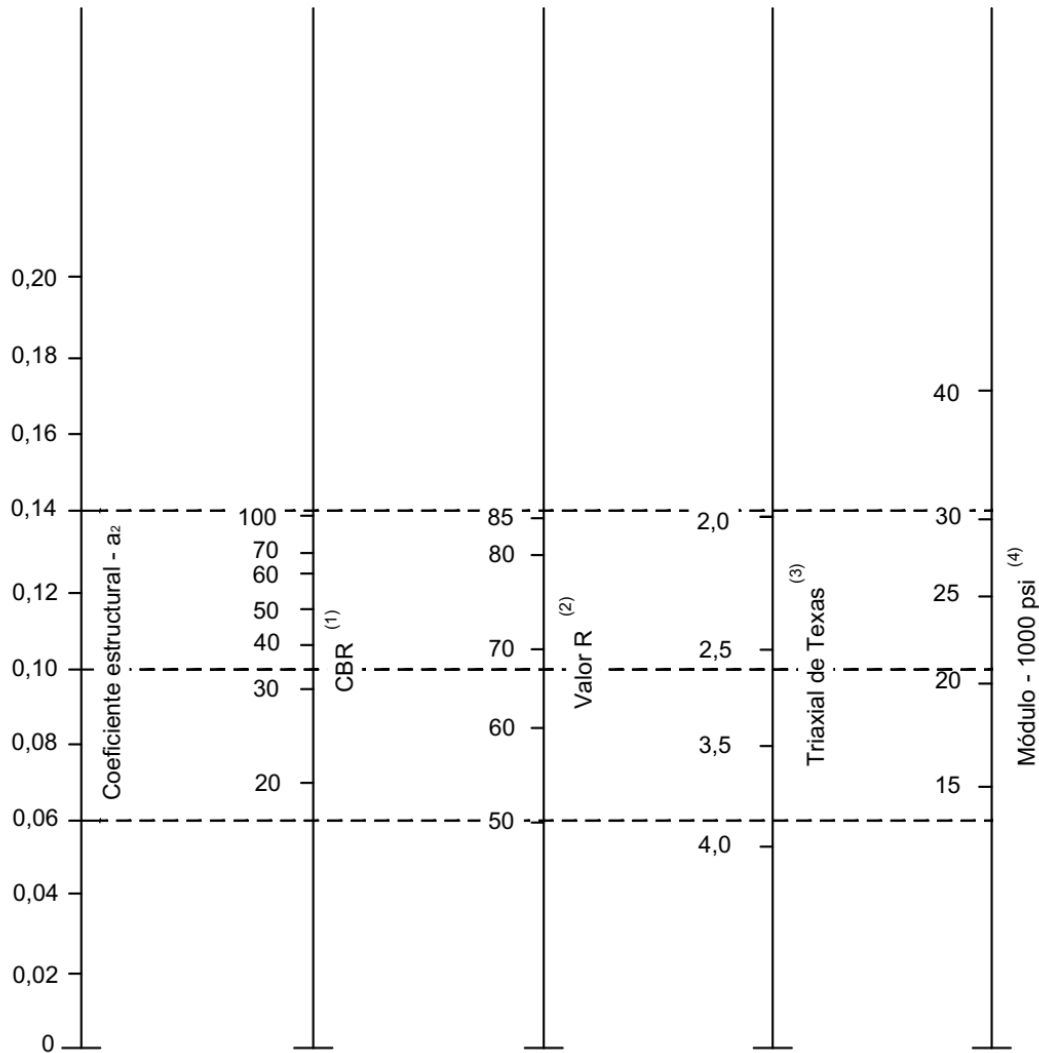


Figura 207-02

*Variación del coeficiente de la base granular (a₂)
con varios parámetros de esfuerzo de la base*

Adaptado de AASHTO, 1993.

Notas:

- (1) Escala derivada de correlaciones obtenidas por Illinois.
- (2) Escala derivada de correlaciones obtenidas por California, Nuevo México y Wyoming.
- (3) Escala derivada de correlaciones obtenidas por Texas.
- (4) Escala derivada en proyectos de NCHRP.

Adicional al nomograma de la Figura anterior el valor de a₂, puede ser estimado con la siguiente fórmula:

$$a_2 = 0,249 (\log_{10} E_{BS}) - 0,977 \qquad \text{Ec. 207-02}$$

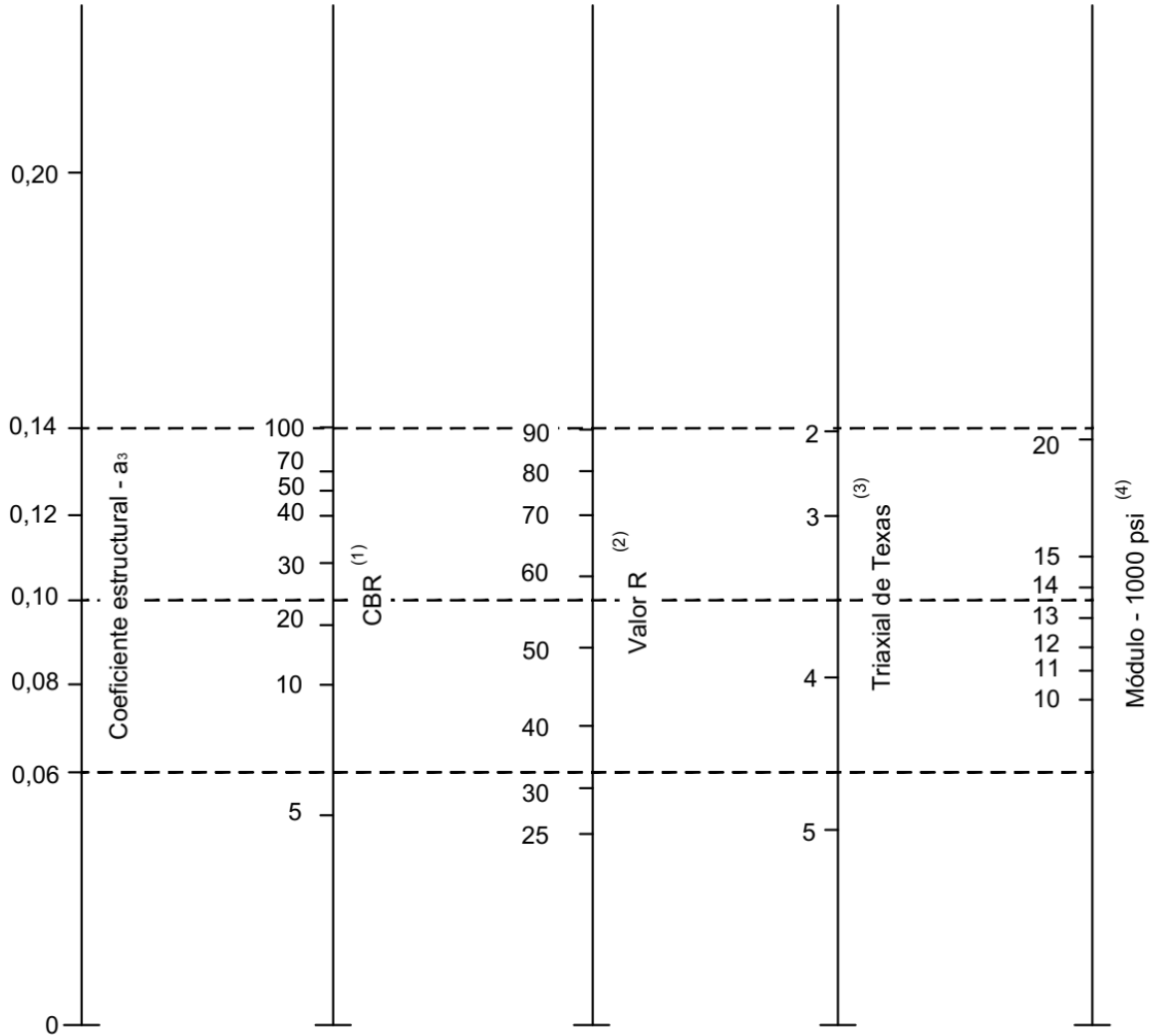


Figura 207-03

Variación del coeficiente de la subbase granular (a_3) con varios parámetros de esfuerzo de la subbase.

Adaptado de AASHTO, 1993.

Notas:

- (1) Escala derivada de correlaciones obtenidas por Illinois.
- (2) Escala derivada de correlaciones obtenidas por California, Nuevo México y Wyoming.
- (3) Escala derivada de correlaciones obtenidas por Texas.
- (4) Escala derivada en proyectos de NCHRP.

Adicional al nomograma de la Figura 207-03 Variación del coeficiente de la subbase granular (a_3) con varios parámetros de esfuerzo de la subbase, el módulo de la base granular, a_3 , puede ser estimado con la siguiente fórmula.

$$a_3 = 0,227 (\log_{10} E_{SB}) - 0,839 \quad \text{Ec. 207-03}$$

Para determinar el SN requerido sobre cada capa del pavimento, se utiliza la relación de la Ecuación 207-04. Este modelo relaciona de forma empírica el tráfico vehicular, el cambio en la serviciabilidad, el módulo resiliente del material a proteger (base, subbase, subrasante) y el nivel de confianza asociado según el tipo de ruta y variabilidad esperada en el tráfico.

$$\text{Log}_{10}W_{18} = Z_r * S_o + 9.36 * \text{Log}_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\text{Log}_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{\frac{0.40 + 1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 * \text{Log}_{10} * M_r - 8.07 \quad \text{Ec. 207-04}$$

Donde,

- W_{18} = Cantidad de ejes equivalentes de 8,2 t (80kN).
- Z_R = Desviación normal estándar para un nivel de confianza dado.
- S_o = Desviación estándar promedio.
- SN = Número estructural.
- ΔPSI = Diferencia entre el PSI inicial y final.
- M_r = Módulo resiliente (psi).

El modelo anterior calcula el SN o número estructural requerido sobre la subrasante, sobre la subbase y sobre la base, SN_3 , SN_2 y SN_1 respectivamente como lo muestra la siguiente figura. Este cálculo se puede realizar de forma manual o con ayuda de un software, de los cuales se pueden encontrar muchos en la web.

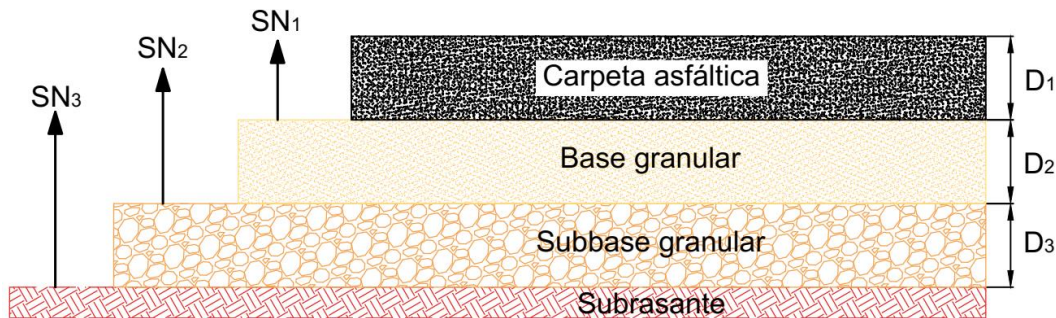


Figura 207-04

Diagrama de números estructurales requeridos

El proceso consiste en determinar un SN_3 total, que es necesario para proteger la subrasante, el cual se logra con el aporte de las diferentes capas que se colocan en la parte superior de la misma. Pero a su vez, es necesario determinar los SN_2 y SN_1 , que son los que indican el espesor de la BG para proteger la subbase y el espesor de la carpeta para proteger a la base granular respectivamente.

SECCIÓN 208 CÁLULO DE ESPESORES PRELIMINARES

Luego de determinar los SN requeridos sobre cada capa del pavimento, se debe estimar los espesores de las capas de pavimento, que combinados, proveen la capacidad de carga total requerida para el diseño (SN_3):

$$SN = a_1D_1 + a_2D_2m_2 + a_3D_3m_3 \quad \text{Ec. 208-01}$$

Donde,

a_1, a_2, a_3 = Coeficientes de la carpeta asfáltica (MAC), base (BG) y subbase (SB) respectivamente.

D_1, D_2, D_3 = Espesor de la carpeta asfáltica, base granular y subbase respectivamente.

m_2, m_3 = Coeficientes de drenaje para las capas de base y subbase granular respectivamente.

La ecuación anterior no tiene una única solución, ya que varias combinaciones pueden satisfacer la demanda de capacidad. La manera recomendada de resolver este conjunto de ecuaciones es iniciar con la carpeta asfáltica y terminar con la subbase, como se presenta a continuación:

$$D_1^* \geq \frac{SN_1}{a_1} \quad \text{Ec. 208-02}$$

$$SN^*_1 = a_1D_1^* \geq SN_1 \quad \text{Ec. 208-03}$$

$$D_2 \geq \frac{SN_2 - SN^*_1}{a_2m_2} \quad \text{Ec. 208-04}$$

$$SN^*_2 = a_2D_2^* > (SN_2 - SN^*_1) \quad \text{Ec. 208-05}$$

$$SN^*_1 + SN^*_2 \geq SN_2 \quad \text{Ec. 208-06}$$

$$D_3^* \geq \frac{SN_3 - (SN^*_1 + SN^*_2)}{a_3m_3} \quad \text{Ec. 208-07}$$

Donde,

- D_1^* = Espesor de la MAC redondeado.
- a_1 = Coeficiente estructural de la capa 1 (MAC).
- SN_1 = SN requerido para proteger la BG.
- SN_1^* = SN requerido para proteger la BG, utilizando el espesor D_1^* .

- $SN_2 =$ SN requerido para proteger la SB.
- $a_2 =$ Coeficiente estructural de la capa 2 (BG).
- $m_2 =$ Coeficiente de drenaje para la capa 2 (BG).
- $D_2 =$ Espesor de BG requerido.
- $D_2^* =$ Espesor de BG redondeado.
- $SN_2^* =$ SN aportado por la BG, considerando el espesor de D_2^* .
- $SN_3 =$ SN total requerido para proteger la SR.
- $a_3 =$ Coeficiente estructural de la capa 3 (SB).
- $m_3 =$ Coeficiente de drenaje para la capa 3 (SB).
- $D_3^* =$ Espesor de la SB redondeado.

Se recomienda que los espesores estimados se redondeen a la media pulgada superior en caso de utilizar unidades inglesas o al centímetro superior en caso de utilizar unidades SI. En la Tabla 208-01 Espesores mínimos recomendados, se presentan los espesores mínimos sugeridos, su uso aplicado a capas asfálticas sobre bases granulares sin tratar.

Tabla 208-01

Espesores mínimos recomendados

Tráfico, ESAL's	Carpeta asfáltica en cm	Base granular en cm
Menos de 50 000	2,5 (1,0 in) o tratamiento superficial	10,0 (4 in)
50 001 – 150 000	5,0 (2,0 in)	10,0 (4 in)
150 001 – 500 000	6,5 (2,5 in)	10,0 (4 in)
500 001 – 2 000 000	7,5 (3,0 in)	15 (6 in)
2 000 001 – 7 000 000	9,0 (3,5 in)	15 (6 in)
Mayor que 7 000 000	10 (4,0 in)	15 (6 in)

Adaptado de AASHTO, 1993.

Para seleccionar los espesores adecuados debe considerarse, además, los métodos constructivos y el proceso de compactación. Por razones de compactación el espesor mínimo de la capa asfáltica debe ser de al menos tres veces el tamaño máximo del agregado.

Hasta este apartado se han abordado los diferentes criterios que pueden utilizarse para generar una estructura de pavimento preliminar, que servirá de base para las posteriores revisiones mecánicas empíricas. En apartados siguientes, se abordarán conceptos

necesarios para determinar las propiedades mecánicas de los materiales dentro del método de diseño mecanístico empírico.

Diseño de pavimentos
mecanístico empírico

División

300

DIVISIÓN 300: DISEÑO DE PAVIMENTOS MECANÍSTICO EMPÍRICO

El diseño de pavimentos mecanístico empírico es una combinación de conceptos en donde se pretende aplicar conocimientos de la mecánica de materiales acordes a cada material, ya que cada uno de ellos poseen comportamientos que los caracterizan. Algunas variables por considerar son:

- Velocidad de operación y frecuencia de carga.
- Temperatura promedio máxima de la mezcla asfáltica.
- Estado de esfuerzos de los materiales granulares y suelos.
- Reducción de capacidad de soporte por factores climáticos como precipitación y temperatura.

Con las propiedades mecánicas estimadas a partir de ensayos de laboratorio, es posible conocer con bastante precisión el módulo resiliente de los materiales. Si los módulos estimados son válidos es posible realizar un análisis de pavimentos, considerando la carga del pavimento.

Aplicando, conceptos de acumulación de daño como la Ley de Miner, que se explicará más adelante, es posible estimar cómo se consume la vida útil del Proyecto, año a año, realizando las estimaciones de los deterioros que se comentaron al inicio de la guía. Posteriormente, se incorpora la variable de confiabilidad para obtener los valores finales de cada deterioro y se verifican los umbrales que se indicaron en la Tabla 102-03 Criterios de desempeño para porcentaje de área agrietada (a la confiabilidad asociada), Tabla 102-04 Criterios de desempeño para grietas longitudinales en el carril de diseño (a la confiabilidad asociada) y Tabla 102-05 Criterios de desempeño ahuellamiento total acumulado (a la confiabilidad asociada).

SECCIÓN 301 FRECUENCIA DE CARGA

La mezcla asfáltica es un material que para simplificar su comportamiento se modela como un material viscoelástico, esto quiere decir que sus propiedades se encuentran definidas por una componente viscosa y otra elástica. Esto hace que el material varíe su comportamiento en función de dos variables principalmente. La velocidad de operación en el Proyecto (asociado al pulso de carga) y la temperatura de la mezcla.

La duración del pulso de carga depende del tipo de carga que se asuma (sinusoidal o triangular), de la velocidad del tránsito esperado y la profundidad de la carpeta asfáltica. En la Figura 301-01 Tiempo de pulsación equivalente del esfuerzo vertical según la velocidad del vehículo y la profundidad (Gráfico de Barksdale), se presenta el gráfico que correlaciona el tipo de carga, la profundidad, la velocidad del vehículo y la duración del pulso de carga. La frecuencia (f) de carga se obtiene como el inverso del tiempo de carga, en unidades de hertz (Hz).

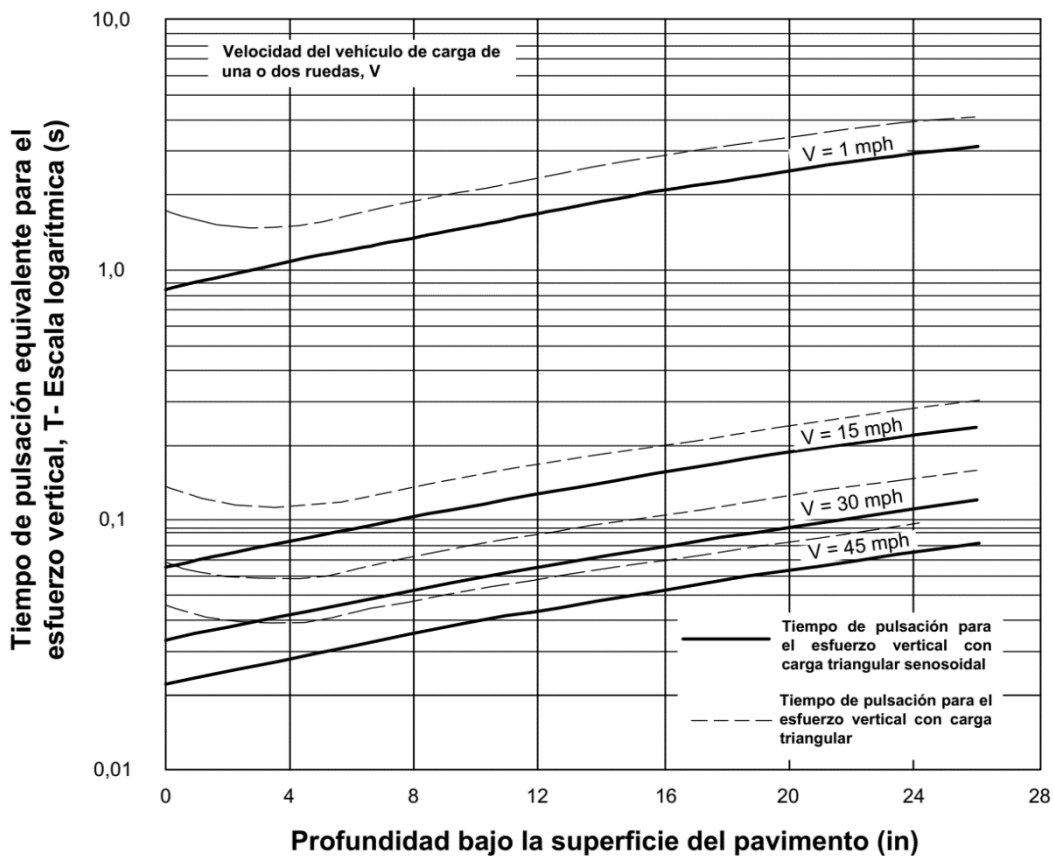


Figura 301-01

Tiempo de pulsación equivalente del esfuerzo vertical según la velocidad del vehículo y la profundidad (Gráfico de Barksdale).

Adaptado de National Cooperative Highway Research Program, 2004.

De forma alternativa al gráfico de la Figura 301-01 Tiempo de pulsación equivalente del esfuerzo vertical según la velocidad del vehículo y la profundidad (Gráfico de Barksdale), se tiene la Ecuación 301-01, de igual forma propuesta por Richard Barksdale en 1971 para correlacionar la velocidad de tránsito con la frecuencia de carga.

$$\log (t) = -0,95 * \log \log (v) + 0,0207 * h - 0,087 \quad \text{Ec. 301-01}$$

Donde,

- $t =$ duración del pulso de carga en segundos.
- $v =$ velocidad de operación en el Proyecto en millas por hora.
- $h =$ profundidad de interés, pulgadas.

A partir de la ecuación anterior, se determina la frecuencia de carga con la relación:

$$f = \frac{1}{t} \quad \text{Ec. 301-02}$$

Donde,

- $f =$ frecuencia de carga en Hz.
- $t =$ duración del pulso de carga en segundos.

La frecuencia de carga permitirá estimar de forma precisa el módulo de la mezcla asfáltica, a partir del ensayo AASHTO T342, Módulo dinámico en mezclas asfálticas.

SECCIÓN 302 FACTOR DE REDUCCIÓN AMBIENTAL (FU)

Los materiales finos asociados a la subrasante pueden presentar una alta susceptibilidad a variar su comportamiento mecánico en función del contenido de agua presente. Es por este motivo que variables como la precipitación y temperatura de la zona del Proyecto condicionarán el comportamiento específico de este material.

El factor de reducción ambiental es un valor que relaciona el valor de módulo resiliente de la subrasante a humedad óptima, respecto al valor esperado en el Proyecto para un mes o periodo predeterminado. Para estimarlo es necesario contar con los siguientes valores:

- Precipitación mensual histórica en la zona del Proyecto, se recomienda un histórico de al menos 10 años.
- Temperatura promedio mensual en la zona del Proyecto, se recomienda un histórico de al menos 10 años.

En caso de ser necesario, la información de estaciones cercanas al proyecto puede ser utilizadas como referencia. La cantidad de estaciones a considerar debe ser definida por el diseñador tomando en cuenta las características propias de cada proyecto, cercanía a las estaciones y topografía.

Con estos datos es posible estimar el índice de Thornthwaite (TMI), el cual brinda una escala para poder clasificar cada zona con base en qué tan propenso es a retener humedad (ver Tabla 302-01 Escala de clasificación de zonas por TMI).

Tabla 302-01

Escala de clasificación de zonas por TMI

Tipo de clima	Índice TMI
Perhúmedo	> 100
Húmedo	80 - 100
Húmedo	60 - 80
Húmedo	40 - 60
Húmedo	20 - 40
Sub-húmedo a húmedo	0 - 20
Seco a sub-húmedo	-20 - 0
Semiárido	-40 - -20
Árido	-60 - -40

En las siguientes líneas se brinda el procedimiento para estimar el TMI (ver Anexo B Cálculo del TMI y Factor de Reducción Ambiental) con la precipitación y temperatura, y la forma de utilizar este indicador, para estimar la saturación en función del tipo de suelo utilizando las curvas características suelo-agua SWCC (*soil water characteristic curves*); las cuales brindan información sobre cómo varía el módulo de resiliencia del suelo con la humedad estimada. En la Ecuación 303-01 se muestra la relación entre el factor de reducción ambiental y el módulo a humedad óptima,

$$FU = \frac{Mr_i}{Mr_{opt}} \quad \text{Ec. 302-01}$$

Donde,

- Mr_i = Módulo afectado por humedad para el i-ésimo mes.
- Mr_{opt} = Módulo resiliente bajo condiciones de humedad óptima.
- FU = Factor de reducción ambiental.

302.01 Evapotranspiración

Para la evapotranspiración se debe contar con datos de precipitación por mes (mm) y de temperatura mensual (°C). Con estos datos se calcula el índice de calor mensual utilizando la Ecuación 302-02.

$$h_i = (0,2t_i)^{1,514} \quad \text{Ec. 302-02}$$

Donde,

h_i = Índice de calor para el i-ésimo mes.
 t_i = Temperatura mensual promedio en °C.

El índice de calor anual para el año “y” (H_y) se calcula a partir de la Ecuación 302-03:

$$H_y = \sum_{i=1}^{12} h_i \quad \text{Ec. 302-03}$$

Además, con el índice de calor anual y la Ecuación 302-04 se calcula la constante “a”.

$$a = 6.75 \times 10^{-7} (H_y^3) + 7.71 \times 10^{-5} (H_y^2) + 0.017921 (H_y) + 0.49239 \quad \text{Ec. 302-04}$$

La evapotranspiración potencial no ajustada para el i-ésimo mes (PE_i) se calcula a partir de la Ecuación 302-05.

$$PE_i = 16 \left(\frac{10t_i}{H_y} \right)^a \quad \text{Ec. 302-05}$$

Donde,

H_y = Índice de calor anual.
 t_i = Temperatura mensual promedio en °C.

El valor de PE_i obtenido de la Ecuación 302-05 representa la evapotranspiración potencial en mm de agua por mes durante un mes de 30 días, con días de 12 horas por día. El PE_i se ajusta según la latitud y el mes del año con la Ecuación 302-06.

$$PE_i' = PE_i \frac{D_i N_i}{30} \quad \text{Ec. 302-06}$$

Donde,

PE_i' = Potencial de evaporación ajustado.

- $D_i =$ Corrección de longitud del día basado en la latitud (ver Tabla 302-02 Factor de corrección de longitud del día para la latitud norte y Tabla 302-03 Factor de corrección de longitud del día para la latitud sur).
- $N_i =$ Número de días en el mes.

Tabla 302-02

Factor de corrección de longitud del día para la latitud norte

Latitud Norte												
Latitud	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
0	1,04	0,94	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04
5	1,02	0,93	1,03	1,02	1,06	1,03	1,06	1,05	1,01	1,03	0,99	1,02
10	1,00	0,91	1,03	1,03	1,08	1,06	1,08	1,07	1,02	1,02	0,98	0,99
15	0,97	0,91	1,03	1,04	1,11	1,08	1,12	1,08	1,02	1,01	0,95	0,97
20	0,95	0,90	1,03	1,05	1,13	1,11	1,14	1,11	1,02	1,00	0,93	0,94
25	0,93	0,89	1,03	1,06	1,15	1,14	1,17	1,12	1,02	0,99	0,91	0,91
26	0,92	0,88	1,03	1,06	1,15	1,15	1,17	1,12	1,02	0,99	0,91	0,91
27	0,92	0,88	1,03	1,07	1,16	1,15	1,18	1,13	1,02	0,99	0,90	0,90
28	0,91	0,88	1,03	1,07	1,16	1,16	1,18	1,13	1,02	0,98	0,90	0,90
29	0,91	0,87	1,03	1,07	1,17	1,16	1,19	1,13	1,03	0,98	0,90	0,89
30	0,90	0,87	1,03	1,08	1,18	1,17	1,20	1,14	1,03	0,98	0,89	0,88
31	0,90	0,87	1,03	1,08	1,18	1,18	1,20	1,14	1,03	0,98	0,89	0,88
32	0,89	0,86	1,03	1,08	1,19	1,19	1,21	1,15	1,03	0,98	0,88	0,87
33	0,88	0,86	1,03	1,09	1,19	1,20	1,22	1,15	1,03	0,97	0,88	0,86
34	0,88	0,85	1,03	1,09	1,20	1,20	1,22	1,16	1,03	0,97	0,87	0,86
35	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16	1,03	0,97	0,86	0,85
36	0,87	0,85	1,03	1,10	1,21	1,22	1,24	1,16	1,03	0,97	0,86	0,84
37	0,86	0,84	1,03	1,10	1,22	1,23	1,25	1,17	1,04	0,97	0,85	0,83
38	0,85	0,84	1,03	1,10	1,23	1,24	1,25	1,17	1,04	0,96	0,84	0,83

Tabla 302-02 (continuación)

Factor de corrección de longitud del día para la latitud norte

Latitud Norte												
Latitud	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
39	0,85	0,84	1,03	1,11	1,23	1,24	1,26	1,18	1,04	0,96	0,84	0,82
40	0,84	0,83	1,03	1,11	1,24	1,25	1,27	1,18	1,04	0,96	0,83	0,81
41	0,83	0,83	1,03	1,11	1,25	1,26	1,27	1,19	1,04	0,96	0,82	0,80
42	0,82	0,83	1,03	1,12	1,26	1,27	1,28	1,19	1,04	0,95	0,82	0,79
43	0,81	0,82	1,02	1,12	1,26	1,28	1,29	1,20	1,04	0,95	0,81	0,77
44	0,81	0,82	1,02	1,13	1,27	1,29	1,30	1,20	1,04	0,95	0,80	0,76
45	0,80	0,81	1,02	1,13	1,28	1,29	1,31	1,21	1,04	0,94	0,79	0,75
46	0,79	0,81	1,02	1,13	1,29	1,31	1,32	1,22	1,04	0,94	0,79	0,74
47	0,77	0,80	1,02	1,14	1,30	1,32	1,33	1,22	1,04	0,93	0,78	0,73
48	0,76	0,80	1,02	1,14	1,31	1,33	1,34	1,23	1,05	0,93	0,77	0,72
49	0,75	0,79	1,02	1,14	1,32	1,34	1,35	1,24	1,05	0,93	0,76	0,71
50	0,74	0,78	1,02	1,15	1,33	1,36	1,37	1,25	1,06	0,92	0,73	0,70

Tabla 302-03

Factor de corrección de longitud del día para la latitud sur

Latitud Sur												
Latitud	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
5	1,06	0,95	1,04	1,00	1,02	0,99	1,02	1,03	1,00	1,05	1,03	1,06
10	1,08	0,97	1,05	0,99	1,01	0,96	1,00	1,01	1,00	1,06	1,05	1,10
15	1,12	0,98	1,05	0,98	0,98	0,94	0,97	1,00	1,00	1,07	1,07	1,12
20	1,14	1,00	1,05	0,97	0,96	0,91	0,95	0,99	1,00	1,08	1,09	1,15
25	1,17	1,01	1,05	0,96	0,94	0,88	0,93	0,98	1,00	1,10	1,11	1,18
30	1,20	1,03	1,06	0,95	0,92	0,85	0,90	0,96	1,00	1,12	1,14	1,21
35	1,23	1,04	1,06	0,94	0,89	0,82	0,87	0,94	1,00	1,13	1,17	1,25
40	1,27	1,06	1,07	0,93	0,86	0,78	0,84	0,92	1,00	1,15	1,20	1,29
42	1,28	1,07	1,07	0,92	0,85	0,76	0,82	0,92	1,00	1,16	1,22	1,31
44	1,30	1,08	1,07	0,92	0,83	0,74	0,81	0,91	0,99	1,17	1,23	1,33
46	1,32	1,10	1,07	0,91	0,82	0,72	0,79	0,90	0,99	1,17	1,25	1,35
48	1,34	1,11	1,08	0,90	0,80	0,70	0,76	0,89	0,99	1,18	1,27	1,37
50	1,37	1,12	1,08	0,89	0,77	0,67	0,74	0,88	0,99	1,19	1,29	1,41

Con la evapotranspiración corregida se procede a calcular el balance de humedad.

302.02 Balance de humedad

Los siguientes pasos se usan para calcular el balance de humedad usando valores de “PE” mensuales.

- Extraer la precipitación mensual (P_i) de los registros climáticos.
- Estimar el almacenamiento de agua inicial y máximo correspondiente al perfil de suelo en la región. El almacenamiento es la capacidad de retención del perfil del suelo en mm de agua. El almacenamiento inicial (S_0) depende de la condición previa de humedad y el almacenamiento máximo (S_{max}) depende del tipo de suelo.
- Para cada mes, realizar un balance de humedad mensual para obtener R y DF, usando el diagrama de flujo en la Figura 302-01 Diagrama de flujo del balance de humedad.

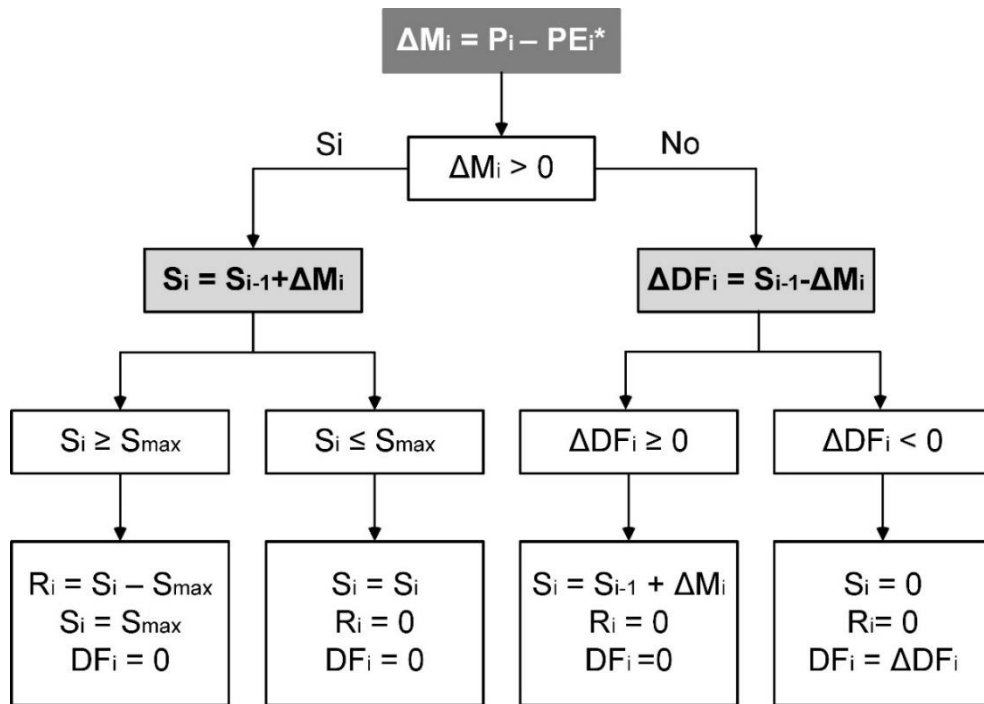


Figura 302-01

Diagrama de flujo del balance de humedad

Con el balance de humedad completo y con la Ecuación 302-07 se procede a calcular TMI_i .

$$TMI_i = \frac{100(R_i) - 60(DF_i)}{PE_i} \quad \text{Ec. 302-07}$$

Donde,

- R_i = Escorrentía en mm de agua para el mes_i.
- DF_i = Déficit en mm de agua para el mes_i.
- PE_i = Potencial de evapotranspiración en mm de agua para el mes_i.

Para estandarizar mediciones considerar un almacenamiento máximo $S_{\max} = 200$ mm (Arias, 2020).

302.03 Caso 1: Subrasante fina (Suelos)

Para iniciar las estimaciones se debe introducir el valor del porcentaje pasando la malla N°. 200 en el análisis granulométrico (P_{200}) y el índice plástico (PI). Con estos valores y con la Ecuación 302-08 se calcula el wPI .

$$wPI = \frac{P_{200} * PI}{100} \quad \text{Ec. 302-08}$$

Para calcular la succión mensual, se necesita encontrar los factores α , β , γ y δ que provienen de la Tabla 302-04 Constantes de regresión para el Modelo $TM1-P200/wPI$. Si el valor de P_{200} o wPI de un suelo se encuentra entre dos de las curvas definidas, el valor de succión debe obtenerse interpolando entre las curvas superior e inferior al valor conocido.

Para interpolar se sigue el siguiente algoritmo:

- (1) Si $P_{200} < 10$ se usan los valores de la fila 1.
- (2) Si $wPI < 0,5$ se interpola con $P_{200}=10$ y $P_{200}=50$ de las filas 1 y 2.
- (3) Si $0,5 < wPI < 5$ se interpola con wPI entre las filas 2 y 3.
- (4) Si $5 < wPI < 10$ se interpola con wPI entre las filas 3 y 4.
- (5) Si $10 < wPI < 20$ se interpola con wPI entre las filas 4 y 5.
- (6) Si $20 < wPI < 50$ se interpola con wPI entre las filas 5 y 6.
- (7) Si $wPI > 50$ se usan los valores de la fila 6.

Tabla 302-04

Constantes de regresión para el Modelo $TM1-P200/wPI$

Fila	P_{200} o wPI	α	β	γ	δ	R^2
1	$P_{200} = 10$	0,30	419,07	133,45	15,00	> 0,99
2	$P_{200} = 50/wPI = 0,5$ o menos	0,30	521,50	137,30	16,00	> 0,99
3	$wPI = 5$	0,30	663,50	142,50	17,50	> 0,99
4	$wPI = 10$	0,30	801,00	147,60	25,00	> 0,99
5	$wPI = 20$	0,30	975,00	152,50	32,00	> 0,99
6	$wPI = 50$	0,30	1171,20	157,50	27,80	> 0,99

Con los valores α , β , γ y δ y la Ecuación 302-09 se calcula la succión mensual.

$$h = \alpha \left[e^{\left[\frac{\beta}{TMI + \gamma} \right]} + \delta \right] \quad \text{Ec. 302-09}$$

Por otro lado, para calcular la saturación se necesita encontrar los factores a_f , b_f , c_f , y h_f que dependen del tipo de suelo, para el caso de la subrasante se considera un suelo plástico sin consolidar; para este, los factores se calculan con las Ecuación 302-10, Ecuación 302-11, Ecuación 302-12 y la Ecuación 302-13

$$a_f = \frac{0,00364(wPI)^{3,35} + 4(wPI) + 11}{6,895}, \text{ psi} \quad \text{Ec. 302-10}$$

$$\frac{b_f}{c_f} = -2,313(wPI)^{0,14} + 5 \quad \text{Ec. 302-11}$$

$$c_f = 0,0514(wPI)^{0,465} + 0,5 \quad \text{Ec. 302-12}$$

$$\frac{h_r}{a_f} = 32,44e^{0,0186(wPI)} \quad \text{Ec. 302-13}$$

Con los factores encontrados y la Ecuación 302-14 se calcula la saturación mensual.

$$\theta_w = \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{h}{h_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{1,45 \times 10^5}{h_r}\right)} \right] * \left[\frac{\theta_{sat}}{\left[\ln\left[1 + \left(\frac{h}{a_f}\right)^{bf}\right]\right]^{cf}} \right]$$

Ec. 302-14

Donde,

- $h =$ Es la succión mensual.
- $\theta_{sat} =$ 1 (100 % de saturación).

Después se procede calcular la saturación óptima con la Ecuación 302-15.

$$S_{opt} = 6,752 \cdot (P_{200} \cdot PI)^{0,147} + 78$$

Ec. 302-15

Finalmente, para calcular el valor de FU (factor de reducción ambiental) se utiliza el modelo propuesto por Cary y Zapata (Cary & Zapata, 2010), que se describe en la Ecuación 302-16.

$$F_{U-STD} = 10 \left[\frac{m \cdot \left((\alpha + \beta \cdot e^{-wPI})^{-1} + \frac{(\delta + \gamma \cdot wPI^{0,5}) - (\alpha + \beta \cdot e^{-wPI})^{-1}}{1 + e^{\left(\ln\left(\frac{-(\delta + \gamma \cdot wPI^{0,5})}{(\alpha + \beta \cdot e^{-wPI})^{-1}}\right) + (\rho + \omega \cdot e^{-wPI})^{0,5} \cdot \left(\frac{S - S_{opt}}{100}\right)\right)}} \right)}{1 + e^{\left(\ln\left(\frac{-(\delta + \gamma \cdot wPI^{0,5})}{(\alpha + \beta \cdot e^{-wPI})^{-1}}\right) + (\rho + \omega \cdot e^{-wPI})^{0,5} \cdot \left(\frac{S - S_{opt}}{100}\right)\right)}} \right]$$

Ec. 302-16

Donde,

- $\alpha =$ -0,600.
- $\beta =$ -1,87194.
- $\delta =$ 0,800.
- $\gamma =$ 0,080.
- $\rho =$ 11,96518.
- $\omega =$ -10,19111.
- $m =$ 1,002.
- $S =$ Saturación mensual calculada con la Ecuación 302-14.
- $S_{opt} =$ Saturación óptima calculada con la Ecuación 302-15.

302.04 Caso 2: Subrasante granular (Arenas)

Se deben introducir los valores del porcentaje pasando la malla N°. 200 en el análisis granulométrico (P_{200}), del índice plástico (PI) y D60. Con estos valores y con la Ecuación 303-08 se calcula el wPI.

Para calcular la succión mensual se necesita encontrar los factores α , β , γ y δ que provienen de la Tabla 302-05 Constantes de regresión para el Modelo TM1-P200. Si el valor de P_{200} de un suelo se encuentra entre dos de las curvas definidas, el valor de succión debe obtenerse interpolando entre las curvas superior e inferior al valor conocido.

Tabla 302-05

Constantes de regresión para el Modelo TM1-P200

P_{200}	α	β	γ	R^2
0	3,649	3,338	- 0,05046	> 0,99
2	4,196	2,741	- 0,03824	> 0,99
4	5,285	3,473	- 0,04004	> 0,99
6	6,877	4,402	- 0,03726	> 0,99
8	8,621	5,379	- 0,03836	> 0,99
10	12,18	6,646	- 0,04688	> 0,99
12	15,59	7,599	- 0,04904	> 0,99
14	20,202	8,15	- 0,05164	> 0,99
16	23,564	8,283	- 0,05218	> 0,99

Con los valores α , β , γ y δ y la Ecuación 302-17 se calcula la succión.

$$h_m = \alpha + e^{[\beta + \gamma(TM1 + 101)]} \quad \text{Ec. 302-17}$$

Para calcular la saturación se necesita encontrar los factores a_f , b_f , c_f , y h_f que dependen del tipo de suelo, para el caso de las bases granulares se supone un suelo granular; para

el cual, los factores se calculan con las Ecuación 303-18, Ecuación 303-19, Ecuación 303-20 y Ecuación 303-21.

$$a_f = \frac{0,8627(D_{60})^{-0,751}}{6,895}, \text{ psi} \quad \text{Ec. 302-18}$$

$$\underline{b_f} = 7,5 \quad \text{Ec. 302-19}$$

$$c_f = 0,1772 \ln(D_{60}) + 0,7734 \quad \text{Ec. 302-20}$$

$$\frac{h_r}{a_f} = \frac{1}{D_{60} + 9,7e^{-4}} \quad \text{Ec. 302-21}$$

Con los factores encontrados y la Ecuación 302-14 se calcula la saturación mensual.

Con la Ecuación 302-17 se calcula la succión y con la Ecuación 302-15 se calcula la saturación óptima.

Finalmente, con la Ecuación 302-16 se calcula el FU para cada mes. Este valor permite ponderar el valor de módulo resiliente de la subrasante considerando la precipitación, temperatura y tipo de suelo. En el Anexo B Cálculo del TMI y Factor de Reducción Ambiental, se muestra un ejemplo de cálculo.

SECCIÓN 303 PROPIEDADES MECÁNICAS PARA EL DISEÑO MECANÍSTICO EMPÍRICO

Las propiedades básicas de los materiales se encuentran especificados en el manual CR-2020 o su versión vigente; por lo tanto, al iniciar un Proyecto se debe realizar una caracterización básica de los materiales por utilizar. En la Tabla 303-01 Valores de CBR mínimos especificados por el CR-2020, se muestran los valores mínimos recomendados por el CR-2020, en cuanto a capacidad de soporte (CBR) para los materiales de base y subbase.

Tabla 303-01

Valores de CBR mínimos especificados por el CR-2020

Capa del pavimento	Valor de CBR mínimo a cumplir
Base	80
Subbase	30

Adaptado de MOPT, 2020.

El diseño de la mezcla debe realizarse de acuerdo con los lineamientos del CR-2020 en su versión vigente. Según la categoría de análisis, se recomienda utilizar una metodología adecuada para realizar los diseños de mezcla (Marshall o Superpave), con la finalidad de mejorar el desempeño de esta conforme la demanda es mayor (ver Tabla 303-02 Diseños de mezcla recomendados según categoría de análisis).

Tabla 303-02

Diseños de mezcla recomendados según categoría de análisis

Categoría de análisis ⁽¹⁾	Tipo según Sección 401 y 402, CR-2020 ⁽²⁾
Categoría 3	Tipo AB
Categoría 2	Tipo AB, C, D
Categoría 1	Tipo C y/o D

Nota:

- (1) Se podría utilizar mezclas de uso especial a criterio de la Administración.
- (2) Las Secciones 401 Diseño de mezcla asfáltica por el método Marshall y 402 Diseño de mezcla asfáltica por el método Superpave®, corresponden al Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes, CR-2020 en su versión vigente.

Las propiedades mecánicas de los materiales pueden obtenerse de distintas formas según el nivel de análisis. Para niveles de análisis más rigurosos, las propiedades de cada uno de los materiales deben obtenerse con pruebas de laboratorio específicas para cada material. Entre menor es el nivel de análisis, se admite modelos genéricos para cada material o correlaciones empíricas. Las tres categorías de análisis son:

- (a) Categoría 3. En esta categoría se permite el uso de procedimientos más sencillos. Las propiedades de los materiales granulares y suelos, se obtienen por medio de correlaciones con otros parámetros, como, por ejemplo, CBR de laboratorio. El módulo dinámico de la mezcla asfáltica se obtiene con ensayos de laboratorio sencillos o modelos matemáticos.
- (b) Categoría 2. En esta categoría el nivel de confianza es intermedio. Para la estimación de las propiedades de los materiales que componen la estructura se utilizan modelos constitutivos para diferentes materiales de Costa Rica, producto de múltiples proyectos de investigación, estos modelos se calibraron con materiales y condiciones específicas para Costa Rica (ver Anexo A Modelos constitutivos y Anexo B Cálculo del TMI y factor

de reducción ambiental). Para la mezcla asfáltica se recomienda realizar el ensayo de módulo dinámico para obtener la curva maestra del material.

- (c) Categoría 1. Mayor confiabilidad posible. Las propiedades mecánicas se obtienen de ensayos de laboratorio realizados a los materiales a utilizar en el Proyecto, mediante ensayos específicos y de mayor detalle, como: módulos resilientes (M_R) de materiales granulares y suelos y módulos dinámicos.

Los procedimientos para obtener los módulos de los materiales asociados a cada nivel de análisis se presentan en la Tabla 303-03 Obtención de los módulos de los materiales según el nivel de análisis.

Tabla 303-03

Obtención de los módulos de los materiales según el nivel de análisis

Categoría de análisis	Obtención de módulos
Categoría 3	<ul style="list-style-type: none"> ● Correlaciones empíricas del módulo resiliente de los materiales granulares y suelos. ● Módulo resiliente a la tensión diametral indirecta (3 temperaturas como mínimo), ensayo AASHTO TP31 o ASTM D7369. ● Curva maestra característica por tamaño máximo nominal (TMN), ensayo AASHTO T342, modelo de predicción de Witczak o similares.
Categoría 2	<ul style="list-style-type: none"> ● Base de datos de ecuaciones constitutivas de materiales granulares (Anexo A.1 Modelos Constitutivos). ● Base de datos de ecuaciones constitutivas de suelos (Anexo A.2 Modelos de Módulo Resiliente para Materiales Granulares). ● Modelo de predicción de Witczak o similares. ● Módulo dinámico para mezcla asfáltica del Proyecto (curvas maestras), ensayo AASHTO T342.
Categoría 1	<ul style="list-style-type: none"> ● Ensayo de módulo resiliente para materiales granulares y suelos propios del Proyecto, ensayo AASHTO T307 ● Módulo dinámico para mezcla asfáltica del Proyecto (curvas maestras), ensayo AASHTO T342.

303.01 Ajuste por temperatura del módulo de la mezcla asfáltica

La mezcla asfáltica es un material viscoelástico, por lo que sus propiedades dependen de la velocidad del tránsito y la temperatura como se mencionó previamente. El módulo de la

mezcla asfáltica debe considerar la temperatura a la que estará expuesto el pavimento. La curva maestra obtenida a partir del ensayo de módulo dinámico para mezcla asfáltica (AASHTO T342), permite estimar el valor de módulo para una temperatura de interés; por lo tanto, es indispensable conocer o estimar la temperatura a la que estará sometido el pavimento asfáltico en el sitio del Proyecto.

A continuación, se presentan algunos modelos para determinar la temperatura de la carpeta asfáltica a partir de condiciones externas, como la temperatura promedio mensual.

- SHRP:

$$T_{sup} = (T_{aire} - 0,00618 * Lat^2 + 0,2289 * Lat + 24,4) * 1,8 + 32 \quad \text{Ec. 303-01}$$

$$T_{pav} = T_{sup}(1 - 0,063 * d + 0,007 * d^2 - 0,0004 * d^3) \quad \text{Ec. 303-02}$$

Donde,

- T_{pav} = Temperatura del pavimento en °F.
- T_{sup} = Temperatura superficial del pavimento en °F.
- T_{aire} = Temperatura promedio del aire en °F.
- Lat = Latitud de la zona en grados decimales.
- d = Profundidad en la mezcla asfáltica en pulgadas (in), se recomienda que se estime a profundidad media.

- LTPP:

$$T_{MAC} = 54,32 + 0,78 * T_{aire} - 0,0025 * Lat^2 - 15,14 * \log(h + 25) \quad \text{Ec. 303-03}$$

Donde,

- T_{MAC} = Temperatura del pavimento en °C.
- T_{aire} = Temperatura promedio del aire en °C.
- Lat = Latitud de la zona en grados decimales.
- h = Profundidad en la mezcla asfáltica en milímetros (mm).

- Instituto del Asfalto:

$$T_{pav} = (T_{aire} * 1,8 + 32) \left[1 + \frac{1}{(d + 4)} \right] - \frac{34}{(d + 4)} + 6 \quad \text{Ec. 303-04}$$

Donde,

- T_{pav} = Temperatura del pavimento en °F.
- T_{aire} = Temperatura promedio del aire en °C.

$d =$ Profundidad en la mezcla asfáltica en pulgadas (in), se recomienda que se estime a profundidad media.

303.02 Módulo resiliente o dinámico para la mezcla asfáltica en caliente (MAC)

En las siguientes líneas se muestra en detalle cómo estimar el módulo resiliente de la mezcla asfáltica considerando la velocidad de operación del Proyecto y temperatura de la zona en función de la categoría de análisis.

303.02.01 Categoría de análisis 3

En la categoría de análisis 3, el dato de entrada del módulo de la mezcla asfáltica puede obtenerse por dos métodos.

- (a) Módulo resiliente a la tensión diametral indirecta. El ensayo ASTM D7369 o AASHTO TP31– 11 *Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension Test*, contiene los procedimientos para la preparación y ensayo de muestras de material bituminoso, que permiten obtener los valores de módulo resiliente, a partir del ensayo de tensión indirecta con cargas repetidas. Se recomienda especificar las temperaturas, según la temperatura de interés para la mezcla asfáltica.
- (b) Curva maestra característica según el tamaño máximo nominal (TMN). En este nivel de análisis podrían utilizarse curvas maestras predefinidas en función del TMN, porcentaje de asfalto y tipo de ligante, para poder contar con información básica adecuada que permita considerar el efecto de la temperatura y frecuencia de carga en el Proyecto.

303.02.02 Categoría de análisis 1 y 2

Para las categorías de análisis 1 y 2 se debe construir la curva maestra para la mezcla asfáltica a utilizar en el Proyecto, con el objetivo de estimar el módulo dinámico del material. Se utilizan principios de superposición tiempo de carga-temperatura, que consiste en realizar el ensayo de módulo dinámico a distintas temperaturas y frecuencias de carga. Los datos de las distintas temperaturas se unen a los de una temperatura de referencia de 70 °F (21° C), para ello se utilizan factores de ajuste que desplazan los puntos horizontalmente con respecto al tiempo de carga, generando una única curva suavizada.

A esta curva suavizada se le conoce como la curva maestra del módulo dinámico y puede ser representada como una ecuación sigmoideal de ajuste no lineal:

$$\text{Log}(E^*) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \log(f_r)}} \quad \text{Ec. 303-05}$$

Donde,

- E^* = Módulo dinámico (psi).
- f_r = Frecuencia de carga a la temperatura de referencia (s).
- δ, α = Parámetros de ajuste. Para datos dados δ representa el valor mínimo de E^* y.
 $\delta + \alpha$ representa el valor máximo de E^* .
- β, γ = Parámetros que describen la forma de la función sigmoideal.

Los parámetros de ajuste δ y α dependen de la granulometría de los agregados, el contenido de asfalto y el porcentaje de vacíos. Los parámetros β y γ dependen del tipo de ligante asfáltico y de los parámetros δ y α .

El procedimiento de laboratorio se realiza con la preparación de especímenes de acuerdo con la norma ASTM D3496 "*Practice for Preparation of Bituminous Specimens for Dynamic Modulus Testing*" y el ensayo según la norma AASHTO T342 "*Standard method of test for determining dynamic modulus of hot mix asphalt (HMA)*".

El ensayo de laboratorio debe realizarse a 5 temperaturas y cada una de estas temperaturas debe ser evaluada a 5 frecuencias de carga. Las temperaturas ensayadas son 10, 40, 70, 100 y 130 °F, y las frecuencias a 0,1, 1, 5, 10, 25 Hz.

La caracterización del ligante asfáltico se realiza con la prueba de laboratorio AASHTO T130, obteniendo los valores del módulo complejo de corte (G^*) y el ángulo de fase (δ) a diferentes temperaturas.

Para la construcción de la curva maestra se recomienda utilizar el software (IMoDin) del LanammeUCR, que requiere como entrada los resultados de los ensayos de laboratorio. Esta interfaz utiliza como datos de entrada las temperaturas, las frecuencias de carga, los ángulos de fase del ensayo de módulo dinámico.

Con los datos ingresados, IMoDin construye la curva maestra que permite obtener el módulo dinámico de la mezcla y el asfalto a cualquier temperatura y frecuencia de carga. El software IMoDin se encuentra disponible en la página web del LanammeUCR, así como la documentación necesaria para su correcto uso.

303.03 Módulo resiliente para los materiales granulares y suelos

Para estimar el módulo resiliente para materiales granulares y suelos, en función de la categoría de análisis, se procederá de la siguiente manera:

303.03.01 Categoría de análisis 3

Para la categoría de análisis 3 se pueden utilizar las correlaciones entre procedimientos de pruebas estándar y las propiedades mecánicas de los materiales. Por ejemplo, se pueden utilizar correlaciones entre el módulo resiliente y la capacidad de soporte del suelo (CBR); por lo tanto, es indispensable obtener el valor de CBR a partir del ensayo correspondiente de laboratorio según la norma AASHTO T193 y conocer el tipo de material. Las ecuaciones de correlación son empíricas y están ligadas a condiciones regionales o nacionales según el lugar donde se desarrollaron.

En la Tabla 303-04 Ecuaciones de correlación entre el CBR y el módulo resiliente, se presentan correlaciones comunes entre el módulo resiliente y el CBR. Se recomienda utilizar la ecuación correspondiente según las condiciones del Proyecto, los datos de entrada, materiales y otras recomendaciones sobre aplicabilidad de la ecuación. Estas ecuaciones sirven de referencia y pueden sustituirse por otras correlaciones, si el ingeniero diseñador lo considera pertinente.

Tabla 303-04

Ecuaciones de correlación entre el CBR y el módulo resiliente

Referencia	Condiciones de la prueba	Condiciones de la prueba de M_R	Ecuación ⁽¹⁾	Comentarios
Heukelom & Klomp (1962):	2 < CBR < 200	Instrumento de compactación vibratoria (propagación de ondas)	$M_R (psi) = 1500 * CBR$	La ecuación provee mejores resultados con valores de CBR < 10 %. Recomendado para suelos de grano fino.
-	-	-	$M_R (psi) = 4326 * \ln(CBR) + 241$	Recomendado por AASHTO, para suelos granulares. CBR > 20 %.
U.S Army Corp of Engineers	2 < CBR < 200	Instrumento de compactación vibratoria	$M_R (ksi) = 5409 * CBR^{0.7111}$	-

Referencia	Condiciones de la prueba	Condiciones de la prueba de M_R	Ecuación ⁽¹⁾	Comentarios
(Green & Hall 1975)		(propagación de ondas)		
CSIR (Witczak et al. 1995)	-	-	$M_R (psi) = 3000 * CBR^{0,65}$	South African Council on Scientific and Industrial Research equation Para CBR de 7,2 % a 20 % según AASHTO93.
Transport and Road Research Laboratory (TRRL 1987)	-	-	$M_R (psi) = 2555 * CBR^{0,64}$	Utilizado para todos los tipos de suelo (NCHRP, 2004).

Nota:

(1) El valor de CBR debe ingresarse como entero no como fracción, por ejemplo, un CBR del 9 %, debe ingresarse como "9".

También pueden utilizarse las correlaciones de los nomogramas de AASHTO-93, que permiten determinar el M_R a partir del CBR. Estos nomogramas se presentan en la Sección 207 Coeficientes estructurales, Figura 207-02 Variación del coeficiente de la base granular (a_2) con varios parámetros de esfuerzo de la base y Figura 207-03 Variación del coeficiente de la subbase granular (a_3) con varios parámetros de esfuerzo de la subbase.

A continuación, en la Tabla 303-05 Valores típicos de módulo resiliente para materiales granulares y subrasantes (módulo al contenido óptimo de humedad), se muestran valores comunes de módulos resiliente según el tipo de suelo. Estos valores pueden utilizarse como guía y evaluar los datos de salida de las ecuaciones de correlación.

Tabla 303-05

Valores típicos de módulo resiliente para materiales granulares y subrasantes (módulo al contenido óptimo de humedad)

Clasificación del material	Rango de M_R	M_R típico
A-1-a	38 500 - 42 000	40 000
A-1-b	35 500 - 40 000	38 000

Clasificación del material	Rango de M_R	M_R típico
A-2-4	28 000 - 37 500	32 000
A-2-5	24 000 - 33 000	28 000
A-2-6	21 500 - 31 000	26 000
A-2-7	21,500 - 28,000	24 000
A-3	24,500 - 35,500	29 000
A-4	21 500 - 29,000	24 000
A-5	17 000 - 25,500	20 000
A-6	13 500 - 24 000	17 000
A-7-5	8 000 - 17 500	12 000
A-7-6	5 000 - 13 500	8 000
CH	5 000 - 13 500	8 000
MH	8 000 - 17 500	11 500
CL	13 500 - 24 000	17 000
ML	17 000 - 25 500	20 000
SW	28 000 - 37 500	32 000
SP	24 000 - 33 000	28 000
SW-SC	21 500 - 31 000	25 500
SW-SM	24 000 - 33 000	28 000
SP-SC	21 500 - 31 000	25 500
SP-SM	24 000 - 33 000	28 000
SC	21 500 - 28 000	24 000
SM	28 000 - 37 500	32 000
GW	39 500 - 42 000	41 000
GP	35 500 - 40 000	38 000
GW-GC	28 000 - 40 000	34 500
GW-GM	35 500 - 40 500	38 500

Clasificación del material	Rango de M_R	M_R típico
GP-GC	28 000 - 39 000	34 000
GP-GM	31 000 - 40 000	36 000
GC	24 000 - 37 500	31 000
GM	33 000 - 42 000	38 500

Adaptado de de NCHRP, 2004.

Es importante aclarar que, en este nivel de análisis, no se realizaría una revisión de módulos resilientes por estado de esfuerzos, a menos que se incorporen módulos constitutivos para estos materiales.

303.03.02 Categoría de análisis 2

Como resultado de proyectos de investigación por parte de la Universidad de Costa Rica, se han desarrollado modelos de predicción del módulo resiliente de materiales granulares de base, subbase y materiales finos de subrasantes (Anexo A Modelos Constitutivos y el Anexo B Cálculo del TMI y Factor de Reducción Ambiental). Estos modelos pueden utilizarse para determinar el módulo resiliente en la categoría de análisis 2, siempre y cuando las condiciones propias de cada Proyecto coincidan con la de los modelos expuestos.

Cada modelo es determinado para un tipo de suelo específico, bajo condiciones de humedad y grado de compactación definidas. El modelo por utilizar en cada diseño debe ser el más similar al tipo de material y condiciones de humedad del Proyecto.

Algunos modelos incorporan la variable θ (invariante de esfuerzos), que representa la dependencia del módulo resiliente con el estado de esfuerzos del material. El θ es el esfuerzo de deformación total, obtenido con la suma de todos los esfuerzos normales principales actuando en el centro de la capa analizada, ver Ecuación 303-06.

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad \text{Ec. 303-06}$$

Donde,

- σ_1 = Esfuerzo principal mayor.
- σ_2 = Esfuerzo principal intermedio.

σ_3 = Esfuerzo principal menor o esfuerzo de confinamiento.

El invariante de esfuerzos también puede ser calculado incluyendo el peso propio del material de la siguiente forma (Instituto Mexicano del Transporte, 2001).

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \gamma * z(1 + 2 * K_o) \quad \text{Ec. 303-07}$$

Donde,

γ = Peso volumétrico promedio.
 z = Profundidad a la cual se determina el módulo.
 K_o = Coeficiente de presión en reposo.

Otros modelos utilizan el τ_{oct} , el cual se define como el esfuerzo cortante octaédrico y cuyo modelo se puede observar en la Ecuación 303-08.

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} * \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} \quad \text{Ec. 303-08}$$

La estimación de esfuerzos principales proviene de los resultados del análisis estructural previo, mediante modelaciones o estimación del estado de esfuerzos en puntos medios de la capa. Como se mencionó en líneas previas, en el Anexo A Modelos Constitutivos y el Anexo B Cálculo del TMI y Factor de Reducción Ambiental, se presentan los modelos de predicción de módulo resiliente, por tipo de material (fino o grueso) y por clasificación SUCS y AASHTO.

303.03.03 Categoría de análisis 1

En la categoría de análisis 1 el módulo resiliente debe obtenerse por medio de ensayos de laboratorio. Los métodos estándar recomendados para el ensayo del módulo resiliente son:

- NCHPRP 1-28, *“Harmonized Test Methods for Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design”*.
- AASHTO T307, *“Determining the Resilient Modulus of Soil and Aggregate Materials”*.

Estas normas de laboratorio describen la preparación de los especímenes, el ensayo y la computarización de los resultados. Con los resultados del ensayo de laboratorio se obtiene

un modelo que describe el comportamiento del módulo resiliente, según el estado de esfuerzos del material.

En el caso de materiales granulares y finos, los coeficientes y exponentes elásticos no lineales de los modelos son obtenidos de la regresión no lineal; de manera que, se ajusten a los módulos de resiliencia generados en el laboratorio. Existen varios modelos que permiten realizar estas predicciones:

- (1) Modelo $k - \theta$: es el modelo recomendado para materiales granulares y estima el módulo resiliente a partir de los esfuerzos principales. El invariante de esfuerzos θ es la suma de los esfuerzos principales que actúan en el espécimen. La relación en escala log-log del MR y θ es lineal, por lo que los coeficientes de regresión pueden obtenerse con una regresión lineal, considerando la forma de la Ecuación 303-09, la Ecuación 303-10 y la Ecuación 303-11; según el tipo de material.

$$M_R = k_1 \theta^{k_2} \quad \text{Ec. 303-09}$$

Donde,

- $k_1, k_2 =$ Coeficientes de regresión.
- $\theta =$ Suma de esfuerzos principales ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$).

De igual forma el invariante de esfuerzos puede ser calculado incluyendo el peso propio con la Ecuación 304-07.

- (2) Modelo $k - \sigma_d$: se utiliza para materiales cohesivos, depende únicamente del esfuerzo desviador aplicado (σ_d):

$$M_R = k_1 \sigma_d^{k_2} \quad \text{Ec. 303-10}$$

Donde,

- $\sigma_d =$ Esfuerzo desviador aplicado ($\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$).
- $\sigma_1 =$ Esfuerzo principal mayor.
- $\sigma_3 =$ Esfuerzo principal menor o esfuerzo de confinamiento.

- (3) Modelo octaédrico: considera el esfuerzo desviador y los esfuerzos de confinamiento. Las constantes se obtienen con un análisis de regresión múltiple de una secuencia de

ensayos dinámicos de módulo resiliente. Los valores de M_R se predicen utilizando la siguiente ecuación:

$$M_R = k_1 * Pa * \left(\frac{\theta}{Pa}\right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa}\right)^{k_3} \quad \text{Ec. 303-11}$$

Donde,

- M_R = Módulo resiliente.
- σ_2 = Esfuerzo principal intermedio.
- τ_{oct} = Esfuerzo cortante octaédrico.
- $\tau_{oct} = \frac{1}{3} * \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$
- Pa = Presión atmosférica.
- k_1, k_2, k_3 = Constantes de la regresión.

a) Para suelos granulares $k_3 = 0$:

$$M_R = k_1 * Pa * \left(\frac{\theta}{Pa}\right)^{k_2} \quad \text{Ec. 303-12}$$

b) Para suelos cohesivos $k_2 = 0$:

$$M_R = k_1 * Pa * \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa}\right)^{k_3} \quad \text{Ec. 303-13}$$

Se recomienda utilizar el siguiente modelo, el cual es una variante del modelo octaédrico y permite mejorar el nivel de ajuste (NCHRP, 2004):

$$M_R = k_1 * Pa * \left(\frac{\theta}{Pa}\right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{k_3} \quad \text{Ec. 303-14}$$

El coeficiente k_1 debe ser positivo, dado que el M_R nunca es negativo. El coeficiente k_2 siempre es positivo, ya que a medida que incrementa θ se produce un aumento en la rigidez del material, que ocasiona un incremento del M_R . El coeficiente k_3 es el exponente del esfuerzo cortante octaédrico. Al aumentar τ_{oct} se produce un debilitamiento o ablandamiento del material, por lo que k_3 debe ser negativo (NCHRP, 2004).

303.04 Notas adicionales para la 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 T193), mediante la cual se decide la capacidad funcional de dicha capa como parte de la estructura del pavimento.

Las clasificaciones posibles para la subrasante corresponden a las siguientes:

- CBR (AASHTO T193) < 3 %: subrasante inaceptable, por lo que correspondería realizar proceso de estabilización, sustitución o la implementación de otra tecnología que mejore las condiciones de CBR de la subrasante.
- CBR (AASHTO T193) > 3 %: subrasante aceptable.
- CBR (AASHTO T193) > 5 %: subrasante deseable.

Cabe recalcar que, es de suma importancia que se caracterice adecuadamente el CBR (AASHTO T193) 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 303-06 Cantidad de ensayos requeridos para caracterizar la subrasante).

Tabla 303-06

Cantidad de ensayos requeridos para caracterizar la subrasante

Etapas 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 m de profundidad	-	3	4
	Cono de penetración dinámico (DCP)/CBR en sitio	ASTM D6951	10	1 cada 100 m
	Porcentaje de humedad natural	-	3	4
Diseño de pavimento por proyecto o sección homogénea	CBR de laboratorio para diseño	AASHTO T193	3	4
	Clasificación de suelos (SUCS y AASHTO)	ASTM D2487 AASHTO M45	3	4

Etapa del proyecto	Ensayo	Norma	Frecuencia mínima por kilómetro	Cantidad mínima por Proyecto
	Límites de Atterberg	AASHTO T89 AASHTO T90	3	4
	Indicación de existencia de nivel de freático	-	3	4
	Porcentaje de humedad natural	-	3	4

Como complemento al análisis preliminar del Proyecto, se recomienda utilizar la metodología de diferencias acumuladas con los valores del DCP y/o SPT para identificar posibles tramos homogéneos, según el procedimiento descrito en el apéndice J de la guía de diseño de la AASHTO-93 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 con los ensayos y frecuencia de la Tabla 303-06 Cantidad de ensayos requeridos para caracterizar la subrasante.

Para definir el CBR (AASHTO T193) 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 bien, un mejoramiento de la subrasante.

En el caso particular de contar con una subrasante con un CBR (AASHTO T193) ubicado entre los valores de 2 % y 3 %, dentro de una vía Categoría 3, es posible realizar una sustitución, siguiendo los procesos de colocación y compactación recomendados en el manual CR-2020 en su versión vigente y que el material de sustitución cumpla con lo establecido en el Contrato, pero no menor al 10 %; lo anterior, para garantizar un adecuado comportamiento estructural. En todo caso dicho espesor y especificaciones de la subrasante deberá ser justificado mediante un análisis de respuestas y disipación de

esfuerzos utilizando un software de multicapa elástica o similar y ser congruentes con la normativa nacional.

Además, se recomienda que en proyectos Categoría 1, se incluya dentro del análisis un estudio geotécnico del Proyecto, que permita identificar a detalle los estratos disponibles, posibles problemas, capacidad soportante y soluciones recomendadas.

Análisis
estructural

División

400

DIVISIÓN 400: ANÁLISIS ESTRUCTURAL

El análisis estructural del pavimento se realiza utilizando un software de multicapa elástica o elemento finito, que permita introducir la cantidad de capas necesarias. El modelo debe ser capaz de determinar los esfuerzos, deflexiones, deformaciones unitarias y esfuerzos totales que se producen dentro de la estructura del pavimento por la acción de las cargas, en diferentes sitios de esta.

Las entradas en el software de análisis son en general: los espesores de las capas, el tipo de material, las cargas, las propiedades mecánicas de los materiales y el módulo de la capa asfáltica a la temperatura y frecuencia requerida.

El módulo de las capas granulares es dependiente de su estado de esfuerzos (no linealidad), por ello las propiedades mecánicas de estos materiales no son constantes. El módulo de los materiales granulares es una entrada del análisis estructural, pero su valor depende del estado de esfuerzos que es una salida, por lo que su análisis se convierte en un proceso iterativo. El módulo resiliente de los materiales granulares y finos debe ser verificado en las categorías de análisis 2 y 1, utilizando los esfuerzos principales obtenidos en el punto medio de las capas, para esta verificación puede modelarse un eje simple sencillo de 9000 lb.

Para la primera estimación de esfuerzos se debe introducir un “módulo semilla” de los materiales granulares y finos. Para todas las categorías de análisis, el módulo semilla corresponde al módulo asociado al valor de CBR, según los nomogramas de AASHTO-93 o las correlaciones empíricas. Se recomienda que el proceso iterativo finalice cuando el error entre los módulos de entrada y los asociados al nivel de esfuerzos (mecánico) sea menor o igual a un 10 %.

Con este análisis inicial y módulos corregidos (por estado de esfuerzos) pueden obtenerse las deformaciones unitarias a tensión en la fibra inferior de la capa asfáltica, asociada con el agrietamiento por fatiga (asociadas a un eje simple dual de 9000 lb). Además, deben determinarse las deformaciones por compresión en el punto medio de la carpeta, de la base, en el punto medio de la subbase, en la fibra superior de la subrasante y a seis pulgadas (15,24 cm) bajo la superficie de la subrasante. Las deformaciones por compresión se utilizan para evaluar el ahuellamiento en cada una de las capas.

En la siguiente sección, se explican los puntos de análisis y la ubicación del eje a considerar para obtener las respuestas de forma adecuada.

SECCIÓN 401 DETERMINACIÓN DE LOS PUNTOS DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Para realizar el análisis de los esfuerzos y deformaciones en la estructura del pavimento se deben tomar puntos específicos que describan efectivamente comportamientos críticos de cada capa de la estructura del pavimento, la ubicación de estos puntos se debe realizar donde se prevé que se presentará el daño máximo en todo el periodo de análisis (NCHRP, 2004).

En la Figura 401-01 Eje de referencia de puntos críticos, se presentan los ejes de referencia de los cuales se basará la determinación de los puntos críticos, también se presenta la posición típica de los mismos. Es importante aclarar que en el caso de utilizar los “ESAL” como unidad para estimar la cantidad de repeticiones de carga en el periodo de diseño, se debe modelar un eje simple dual de 9000 lb (4500 lb por llanta).

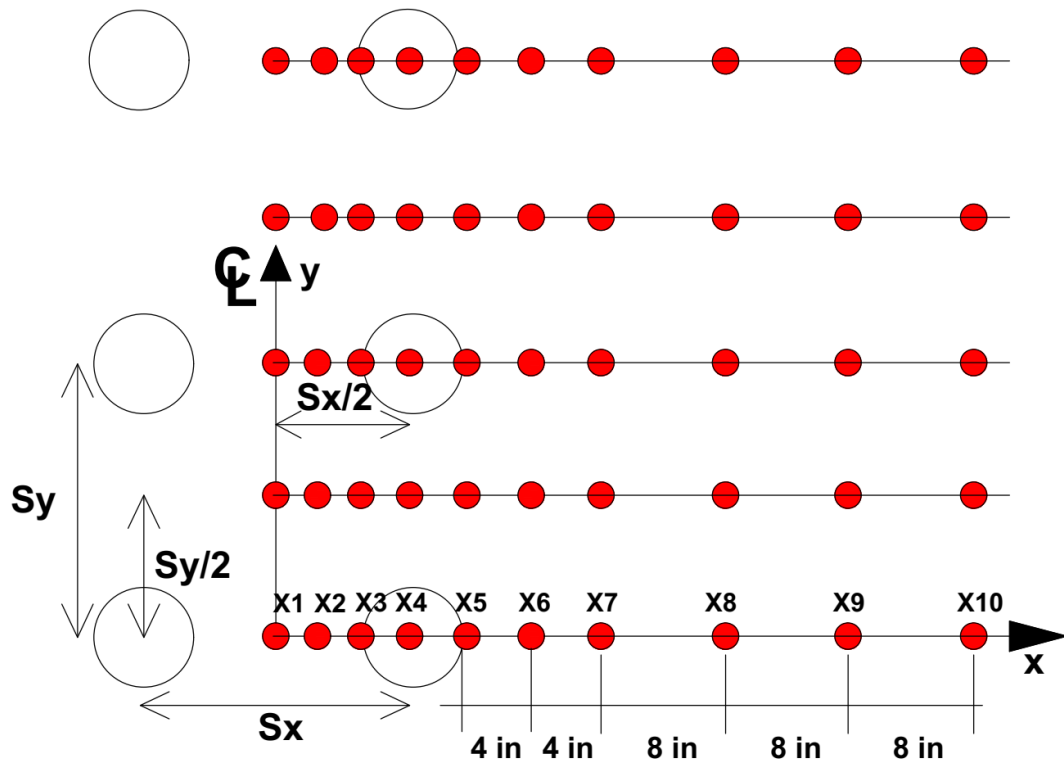


Figura 401-01

Eje de referencia de puntos críticos

Adaptado de NCHRP, 2004.

Los puntos correspondientes al eje X se calculan de la siguiente forma:

$X1 = 0$	Ec. 401-01
$X2 = \frac{\left(\frac{T_{\text{espaciamiento}}}{2}\right) - T_{\text{radio}}}{2}$	Ec. 401-02
$X3 = \left(\frac{T_{\text{espaciamiento}}}{2}\right) - T_{\text{radio}}$	Ec. 401-03
$X4 = \frac{T_{\text{espaciamiento}}}{2}$	Ec. 401-04
$X5 = \left(\frac{T_{\text{espaciamiento}}}{2}\right) + T_{\text{radio}}$	Ec. 401-05
$X6 = \left(\frac{T_{\text{espaciamiento}}}{2}\right) + T_{\text{radio}} + 10,2 \text{ cm}$	Ec. 401-06
$X7 = \left(\frac{T_{\text{espaciamiento}}}{2}\right) + T_{\text{radio}} + 20,4 \text{ cm}$	Ec. 401-07
$X8 = \left(\frac{T_{\text{espaciamiento}}}{2}\right) + T_{\text{radio}} + 40,6 \text{ cm}$	Ec. 401-08
$X9 = \left(\frac{T_{\text{espaciamiento}}}{2}\right) + T_{\text{radio}} + 61 \text{ cm}$	Ec. 401-09
$X10 = \left(\frac{T_{\text{espaciamiento}}}{2}\right) + T_{\text{radio}} + 81,3 \text{ cm}$	Ec. 401-10

Donde,

$T_{\text{espaciamiento}}$ = Espaciamiento entre cada llanta de un par en un eje dual.

T_{radio} = Radio de contacto de la llanta.

En el eje Y los puntos que se analizan dependen del tipo de eje que posea el vehículo de análisis. Los puntos se ubican de la siguiente forma:

$Y1 = 0$	Ec. 401-11
$Y2 = S_{\text{tandem}}$	Ec. 401-12
$Y3 = \frac{S_{\text{tandem}}}{2}$	Ec. 401-13
$Y4 = S_{\text{tridem}}$	Ec. 401-14
$Y5 = \frac{S_{\text{tridem}}}{2}$	Ec. 401-15
$Y6 = \frac{3S_{\text{tridem}}}{2}$	Ec. 401-16
$Y7 = 2S_{\text{tridem}}$	Ec. 401-17

Donde,

S_{tandem} = Separación entre ejes tándem.

S_{tridem} = Separación entre ejes tridem.

En cuanto a la ubicación de los puntos en la profundidad de las capas, los puntos críticos del pavimento se dan por fatiga y ahuellamiento. Los puntos críticos por fatiga se ubican:

- En la superficie del pavimento ($z = 0,01 \text{ cm}^*$).
- Fibra inferior de la capa de mezcla asfáltica (espesor de MAC – $0,01 \text{ cm}^*$).
- Fibra inferior de la base estabilizada, si la misma forma parte del paquete estructural (espesor de base estabilizada – $0,01 \text{ cm}^*$).

*Considerando que el eje vertical, es positivo de arriba hacia abajo (dentro de la estructura de pavimento).

Al realizar el análisis por ahuellamiento se deben tomar en cuenta los puntos que se ubican:

- Profundidad intermedia para cada capa de la estructura del pavimento.
- En la fibra superior de la subrasante.
- A 15,24 cm (6 in) debajo de la subrasante.

SECCIÓN 402 DAÑO ACUMULADO Y DESVIACIÓN LATERAL

Para la optimización del diseño del pavimento es necesario la recolección de información relacionada a diferentes aspectos que puedan afectar el desempeño de los pavimentos.

Uno de los aspectos a considerar es la desviación lateral de las llantas “*Wheel wander*”. En muy pocas ocasiones los recorridos realizados por los vehículos se dan en línea recta, por lo que al diseñar una estructura de pavimentos sin tomar en cuenta el posible desplazamiento lateral, se podría obtener un diseño con respuestas mayores a las que el pavimento será sometido en campo (Engar, 2018).

Según el *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP), este parámetro es utilizado para la estimación del daño por fatiga. Un aumento de la desviación lateral significa un aumento en la vida útil del pavimento, ya que las cargas están más distribuidas.

Para el cálculo del *wander* o desviación lateral, en primera instancia se deben determinar los puntos donde se analizará la respuesta del pavimento. Estos puntos corresponden a los mismos que se determinaron en la sección anterior.

Posteriormente, se utiliza una distribución normal para determinar la distancia a la que la carga será desplazada lateralmente sobre el pavimento. En la Figura 402-01 Esquema del desplazamiento lateral de la carga, se muestra la carga aplicada sobre el pavimento y el uso de la distribución normal para modelar el desplazamiento lateral de las llantas (NCHRP, 2004). La determinación de las distancias de desplazamiento lateral depende de la desviación estándar utilizada en la modelación, con esto se obtienen las posiciones A, B, C, D y E que se calculan de la siguiente manera:

$$\text{Posición A} = X_i + 1,28155 \times DE \quad \text{Ec. 402-01}$$

$$\text{Posición B} = X_i + 0,5244 \times DE \quad \text{Ec. 402-02}$$

$$\text{Posición C} = X_i + 0 \times DE \quad \text{Ec. 402-03}$$

$$\text{Posición D} = X_i - 0,5244 \times DE \quad \text{Ec. 402-04}$$

$$\text{Posición E} = X_i - 1,28155 \times DE \quad \text{Ec. 402-05}$$

Donde,

$DE =$ Desviación estándar (generalmente $DE = 25,4$ cm).

$X_i =$ Posición inicial del punto i.

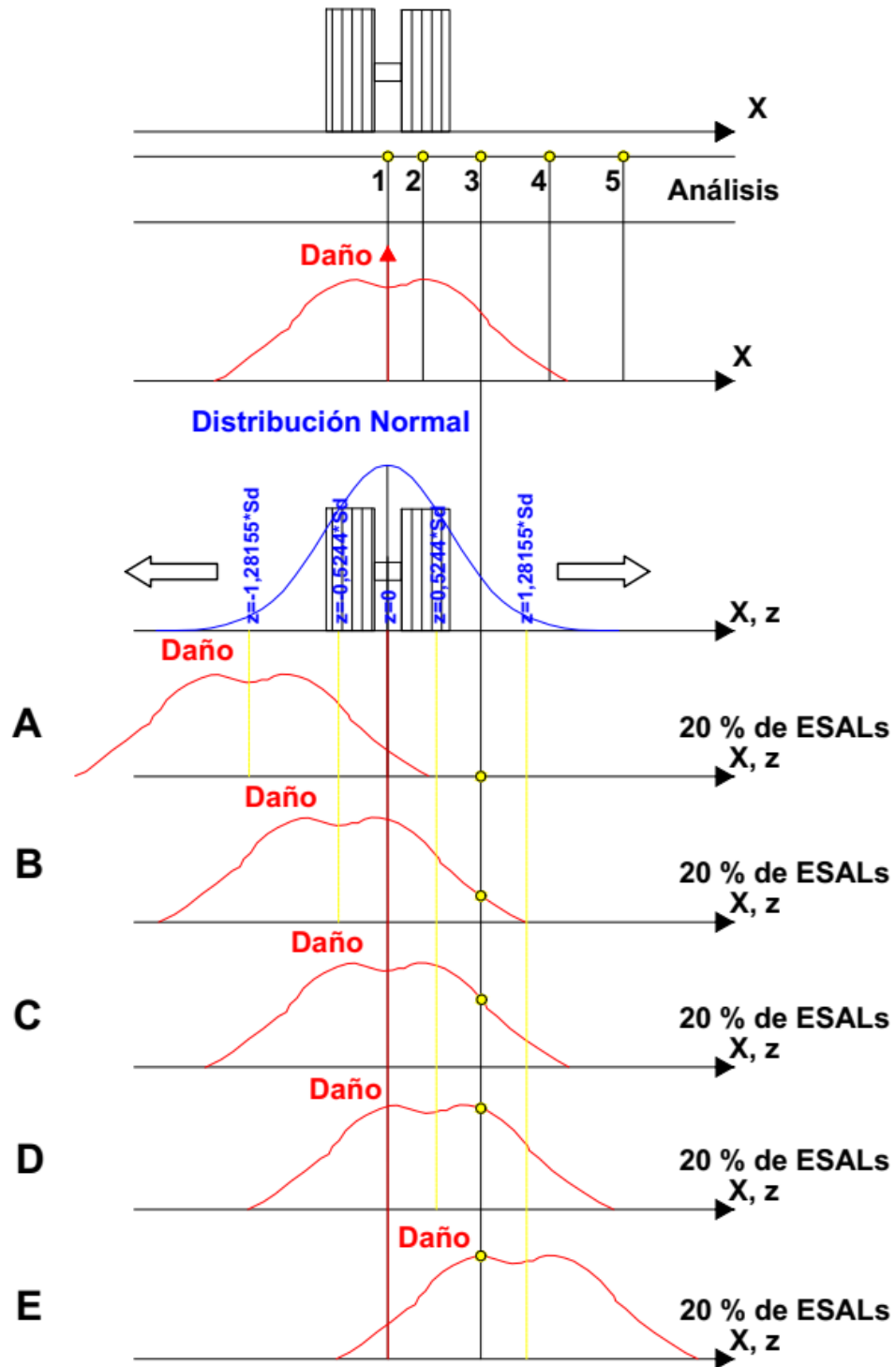


Figura 402-01

Esquema del desplazamiento lateral de la carga

Adaptado de NCHRP, 2004.

Esta desviación estándar puede ser estimada a partir de estos tres niveles de información:

- (a) Categoría 1. Determinación de la desviación estándar por medio de medidas realizadas directamente en segmentos específicos.
- (b) Categoría 2. Un promedio regional o estatal determinado por mediciones en vías con características de tráfico y condiciones de sitio similares.
- (c) Categoría 3. Un promedio nacional o un estimado basado en la experiencia local.

Para un nivel categoría 3 de información se recomienda una desviación estándar de 0,254 m (10 in) (NCHRP, 2004).

En la Figura 402-02 Esquema del desplazamiento lateral de la carga, Posición C, se muestra un ejemplo de la posición inicial (posición C) de los puntos de análisis. Cabe destacar que, el eje de referencia utilizado en la modelación inicia en el centro de la distancia entre el borde interno de cada llanta en un eje dual. En la Figura 402-03 Esquema del desplazamiento lateral de la carga, Posición A, se muestra el desplazamiento de los puntos a la posición A.

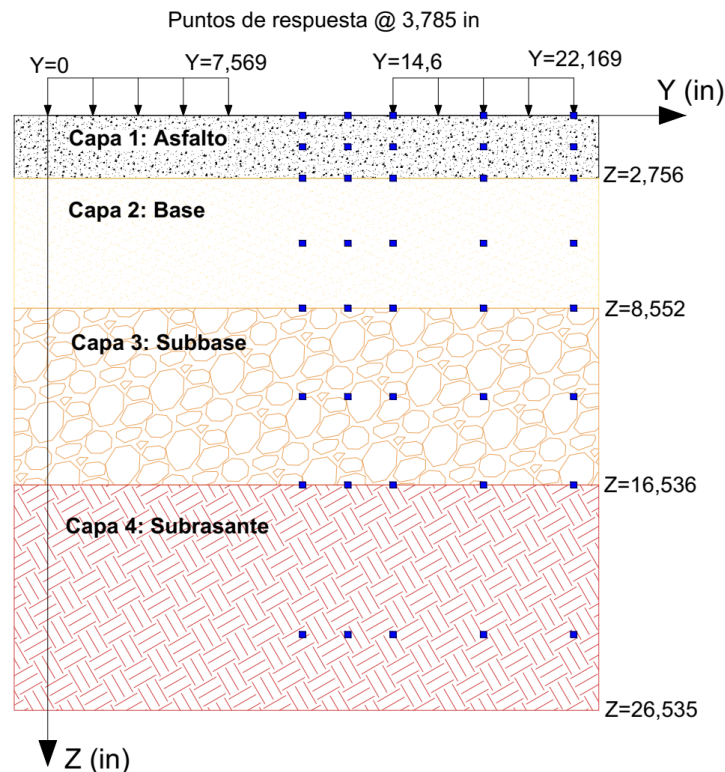


Figura 402-02

Esquema del desplazamiento lateral de la carga, Posición C

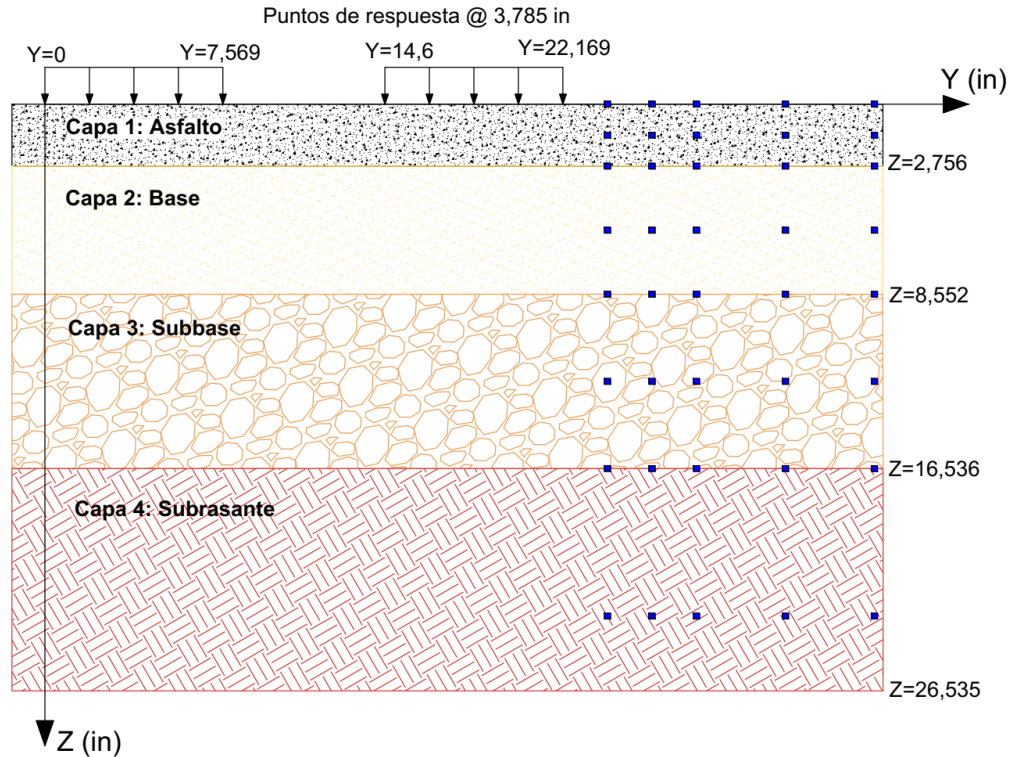


Figura 402-03

Esquema del desplazamiento lateral de la carga, Posición A

Con ayuda del software de multicapa elástica, se calculan las deformaciones unitarias ϵ_i (tensión normal) en la capa de mezcla asfáltica del pavimento, para así poder calcular la cantidad de repeticiones admisibles (N_f) sobre el punto estudiado y posteriormente realizar el cálculo del daño por medio de la Ley de Miner, que está dada por:

$$D = \sum_{i=1}^T \frac{n_i}{N_{fi}} \quad \text{Ec. 402-06}$$

Donde,

- $D =$ Daño.
- $T =$ Total de periodos.
- $n_i =$ Tránsito real en el periodo i.
- $N_{fi} =$ Tránsito permitido bajo las condiciones de servicio en el periodo i.

Cuando se analice la respuesta del pavimento tomando en cuenta la desviación lateral de las llantas, n_i es el 20 % de los ESAL's de diseño (para el periodo i); ya que representa el

20 % del tráfico. El N_f dependerá del modelo de fatiga utilizado y las deformaciones registradas.

Finalmente, se calcula el daño total que experimenta cada punto del pavimento, esto se realiza sumando el daño de los puntos, obtenido en cada posición. Por lo que el daño total en la posición i está dado por:

$$D_i = D_{A-i} + D_{B-i} + D_{C-i} + D_{D-i} + D_{E-i} \quad \text{Ec. 402-07}$$

En la Tabla 402-01 Ejemplo de cálculo para el punto 1 de daño, se muestra un ejemplo del cálculo de daño para el punto 1, dado por la suma de los daños en las posiciones A, B, C, D, E. El diseño del pavimento se deberá realizar tomando en cuenta el punto i con el mayor daño obtenido. El procedimiento anterior solo se puede aplicar para el análisis del daño por fatiga, no se puede realizar para analizar el daño por ahuellamiento.

En el ejemplo presentado, se utilizaron los siguientes datos:

- ESAL's = 500 000
- Carga = 4 500 lb
- Presión llantas = 100 psi
- Módulo Carpeta Asfáltica = 279 000 psi
- Espesor Carpeta Asfáltica = 7 cm

En la siguiente tabla se utilizan varias ecuaciones, las que hacen referencia a la Ecuación 402.06 y 402.07.

Tabla 402-01

Ejemplo de cálculo para el punto 1 de daño (Ecuación 401-01), tomando en cuenta desviación lateral

Punto	Posición	$\epsilon_t^{(1)}$	N_f	n	Daño
1	A	262,4	18 249 556	100 000	0,0055
1	B	482,83	1 642 041	100 000	0,0609
1	C	308,56	9 623 304	100 000	0,0104
1	D	486,53	1 593 276	100 000	0,0628
1	E	253,21	21 008 628	100 000	0,0048
Daño total (suma)					0,1443

Nota: Los valores de ϵ_t se obtuvieron de una modelación con un software de multicapa elástica.

Modelos de
predicción de
desempeño

División

500

DIVISIÓN 500: MODELOS DE PREDICCIÓN DE DESEMPEÑO

En esta División se muestran los diferentes modelos que permiten estimar los deterioros esperados para las condiciones estimadas, propiedades de los materiales y las modelaciones realizadas. Es importante considerar que los modelos acá expuestos corresponden a la componente empírica de la presente guía, ya que los mismos deben calibrarse utilizando datos de campo (observaciones visuales).

Los modelos que se presentan son congruentes a los expuestos en la Guía AASHTOWare ME (AASHTO, 2015) y MEPDG (NCHRP, 2004). Como avance importante se tiene que los modelos de fatiga, área agrietada y grietas longitudinales incorporan factores de calibración local, estimados a partir de datos experimentales (Arias, 2020). En el Anexo D.1 Análisis de Sensibilidad Modelos de la GDP-2024, de la presente guía, se muestra un análisis de sensibilidad para los modelos recomendados.

SECCIÓN 501 AHUELLAMIENTO

El ahuellamiento total del pavimento corresponde a la acumulación de deformaciones plásticas en las diferentes capas del pavimento, producto de las diferentes aplicaciones de carga a la que se ve sometida la carretera durante la vida útil.

Se recomienda realizar una revisión de la deformación permanente en mezclas asfálticas en caliente, materiales granulares y subrasantes, con el objetivo de minimizar el potencial de ahuellamiento en los pavimentos.

Los modelos de ahuellamiento mostrados en esta guía corresponden a una recopilación de estudios internacionales publicados desde el año 2004, con la MEPDG del 2004 (NCHRP, 2004), y finalizando con la AASHTOWare ME publicada en el 2015 (AASHTO, 2015); sin embargo, han sido revisados mediante la realización de diseños con variables nacionales y han sido contrastados con materiales y modelos de laboratorio costarricenses (Anexo D.2 Comparación de predicciones de modelos de ahuellamiento de materiales nacionales vs el modelo de la AASHTOWare ME), para garantizar la compatibilidad de resultados. Esto se hace debido a la robustez que ha demostrado tener este modelo, teniendo pocas variaciones desde el año 2004 y cuya aplicabilidad se encuentra más estandarizada.

501.01 Ahuellamiento en la mezcla asfáltica

Este corresponde al ahuellamiento de las primeras capas del pavimento, asociado a las deformaciones resilientes y plásticas a profundidad media del pavimento, a la temperatura del pavimento. En la Ecuación 501-01 se muestra la ecuación general que permite estimar el ahuellamiento en la MAC, (AASHTO, 2015).

$$\varepsilon_p = 10^{-3,35412} * T^{1,5606} * N^{0,4791} * \varepsilon_r \quad \text{Ec. 501-01}$$

$$\delta_{MAC} = \sum_{i=1}^{n \text{ capas}} \varepsilon_p^i * k_z \quad \text{Ec. 501-02}$$

Donde,

- ε_p = Deformación plástica acumulada a N repeticiones de carga (in/in).
- ε_r = Deformación resiliente a compresión en la MAC (in/in).
- T = Temperatura de la mezcla (°F).
- N = Número de repeticiones de carga (ESAL's).
- δ_{MAC} = Deformación permanente total de la capa asfáltica (in).
- k_z = Parámetro de profundidad, calculado por:

$$k_z = (C_1 + C_2 * d) * 0,328196^d \quad \text{Ec. 501-03}$$

$$C_1 = -0,1039 * h_{ac}^2 + 2,4868 * h_{ac} - 17,342 \quad \text{Ec. 501-04}$$

$$C_2 = 0,0172 * h_{ac}^2 - 1,7331 * h_{ac} + 27,428 \quad \text{Ec. 501-05}$$

Donde,

- h_{ac} = Espesor total de la capa asfáltica (in).
- d = Profundidad del punto analizado (in).

501.02 Ahuellamiento en materiales granulares

Los modelos siguientes permiten obtener la deformación permanente en bases y subbases granulares (NCHRP, 2004).

$$\delta_a = \beta_1 * \left(\frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_r}\right) e^{-\left[\frac{\rho}{N}\right]^\beta} \varepsilon_v h \quad \text{Ec. 501-06}$$

$$\log \beta = -0,61119 - 0,017638 * W_c \quad \text{Ec. 501-07}$$

$$\left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r}\right) = \frac{\left(e^{(\rho)^\beta} * 0,15\right) + \left(e^{(\rho/10^9)^\beta} * 20\right)}{2} \quad \text{Ec. 501-08}$$

$$\rho = 10^9 \left[\frac{\ln \left[\frac{(0,15)}{20} \right]}{1 - (10^9)^\beta} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad \text{Ec. 501-09}$$

$$W_c = 51,712 \left[\left(\frac{E_r}{2555} \right)^{\frac{1}{0,64}} \right]^{-0,3586 * GTW^{0,1192}} \quad \text{Ec. 501-10}$$

Donde,

- $\delta_a =$ Deformación permanente para la capa/subcapa, in.
- $N =$ Número de repeticiones de carga.
- $\beta_1 =$ Factor de calibración, 2,03 para bases/subbases granulares y 1,35 para los suelos finos.
- $\varepsilon_r =$ Deformación elástica utilizada en la prueba de laboratorio para obtener las propiedades del material (ε_o , β , ρ).
- $\varepsilon_o, \beta, \rho =$ Propiedades del material.
- $\varepsilon_v =$ Deformación elástica promedio vertical en la capa/subcapa.
- $h =$ Espesor de la capa/subcapa (in).
- $W_c =$ Contenido de agua (%).
- $E_r =$ Módulo resiliente de la capa/subcapa (psi).
- $GTW =$ Profundidad del nivel freático (ft).

501.03 Ahuellamiento en la subrasante

Para calcular la deformación de la subrasante se realizan los siguientes pasos (NCHRP, 2004). También se esquematiza en la Figura 501-01 Diagrama para determinar el ahuellamiento en la subrasante:

- (1) Se calcula la respuesta del pavimento en la superficie de la subrasante y a 6 in de profundidad en la subrasante (ε_v).
- (2) Utilizando las ecuaciones descritas para materiales granulares, se calcula $\left(\frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_r}\right)$, β y ρ para $z = 0$ y $z = 6$ in.
- (3) Utilizando los valores obtenidos en el paso anterior, se calcula la deformación plástica para cada profundidad:

$$\varepsilon_p(z) = \beta_1 * \left(\frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_r}\right) e^{-\left[\frac{z}{N}\right]^\beta} \varepsilon_v \quad \text{Ec. 501-11}$$

- (4) Se calcula el parámetro k :

$$k = \frac{1}{6} \ln \left(\frac{\varepsilon_{p,z=0}}{\varepsilon_{p,z=6}} \right) \quad \text{Ec. 501-12}$$

- (5) La deformación permanente total se calcula como:

$$d\delta = \varepsilon_p(z) dz \quad \text{Ec. 501-13}$$

$$\delta = \int_0^{h_{roca}} \varepsilon_p(z) dz \quad \text{Ec. 501-14}$$

$$\delta_{SR} = \varepsilon_{p,z=0} \int_0^{h_{roca}} e^{-kz} dz = \left(\frac{1 - e^{-kh_{roca}}}{k} \right) * \varepsilon_{p,z=0} \quad \text{Ec. 501-15}$$

Donde,

- δ_{SR} = Deformación plástica total de la subrasante, in.
- h_{roca} = Profundidad de la capa rocosa, ft ($z = 0$ representa la superficie de la subrasante).

Nota: En el caso de que ε_v en la superficie de la subrasante sea mayor a ε_v a 6 in, el coeficiente k de la Ecuación 501-12, debe ser limitado al valor de 0,0000001.

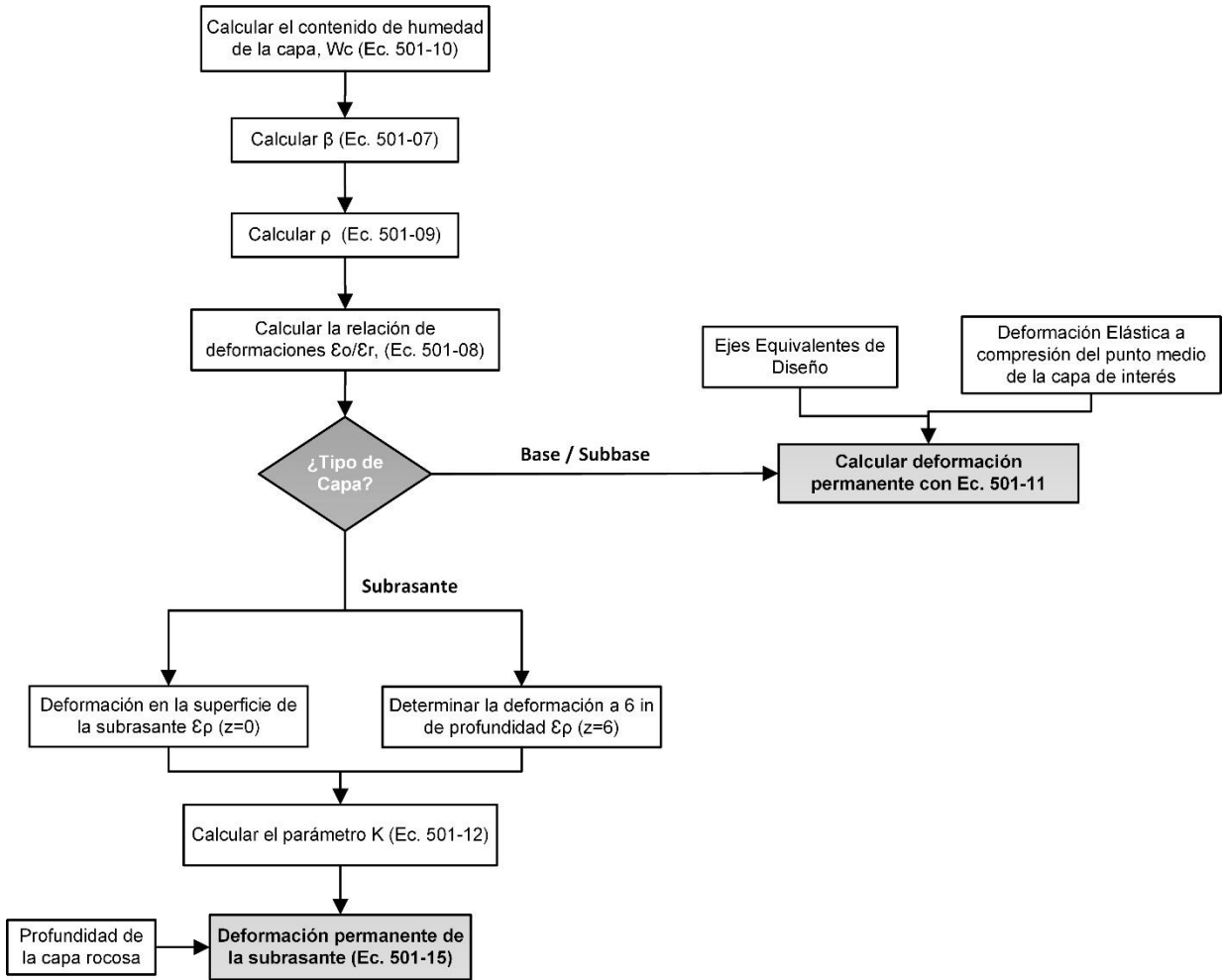


Figura 501-01

Diagrama para determinar el ahuellamiento en materiales granulares y suelos

SECCIÓN 502 FATIGA EN MEZCLA ASFÁLTICA

Este apartado contiene el modelo para determinar la resistencia a fatiga en mezclas asfálticas recomendado por la AASHTOWare ME (AASHTO, 2015), con los factores de calibración locales para Costa Rica. Se aclara que los factores de calibración locales presentados, son una primera versión y se desarrollaron con información obtenida de ensayos acelerados en Costa Rica, sobre estructuras de pavimentos con espesores de capa de mezcla asfáltica menores a 20 cm. Por lo tanto, no es posible garantizar que los modelos de desempeño calibrados para Costa Rica predigan con fiabilidad el comportamiento de estructura de pavimento flexibles con capas de rueda de más de 20 cm de espesor.

$$N_f = 0,007566 * C * k'_{1} * B_{f1} * \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3,9492B_{f2}} \left(\frac{1}{E^*}\right)^{1,281B_{f3}} \quad \text{Ec. 502-01}$$

$$C = 10^M \quad \text{Ec. 502-02}$$

$$M = 4,84 \left[\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0,69 \right] \quad \text{Ec. 502-03}$$

Donde,

- N_f = Cantidad máxima de repeticiones a fatiga para la falla (ESAL's).
- ε_t = Deformación por tensión en la zona de interés de la capa asfáltica (in/in). Fibra inferior para grieta de abajo-arriba y fibra superior para grietas de arriba-abajo.
- E^* = Módulo dinámico de la mezcla asfáltica (psi).
- k'_{1} = Parámetro de corrección según tipo de grieta.
- V_b = Contenido de asfalto efectivo por volumen (%).
- V_a = Porcentaje de vacíos (%).

Factores locales para Costa Rica

- $B_{f1} = 0,9739$
- $B_{f2} = 0,9948$
- $B_{f3} = 1,0907$

Nota: La ecuación de "N_f" (Ecuación 502-01), sólo debe ser evaluada para valores de "ε_t" a tensión, para ambos casos, es decir, grietas de abajo-arriba y arriba-abajo.

Para agrietamiento de abajo-arriba:

$$k'_{1} = \frac{1}{0,000398 + \frac{0,003602}{1 + e^{(11,02-3,49*h_{ac})}}} \quad \text{Ec. 502-04}$$

Para agrietamiento de arriba-abajo:

$$k'_{1} = \frac{1}{0,01 + \frac{12}{1 + e^{(15,676-2,8186*h_{ac})}}} \quad \text{Ec. 502-05}$$

Para convertir de porcentaje de asfalto por peso a volumen puede utilizarse la siguiente relación.

$$V_{b \text{ volumen}} = V_{b \text{ peso}} \frac{\text{Densidad}_{MAC}}{\text{Densidad}_{ligante}} \quad \text{Ec. 502-05}$$

Donde,

$V_{b\ volumen} =$	Porcentaje de asfalto por volumen (10 % - 17 % aproximadamente).
$V_{b\ peso} =$	Porcentaje de asfalto por peso (4 % - 7 % aproximadamente).
$Densidad_{MAC} =$	Densidad de la mezcla en t/m ³ .
$Densidad_{ligante} =$	Densidad del ligante en t/m ³ .
$h_{ac} =$	Espesor de la capa asfáltica (in).

502.01 Área agrietada

Para estimar el daño por fatiga se utiliza la Ecuación 402-06, según se indicó en la Sección 402 Daño acumulado y desviación lateral:

El porcentaje de área agrietada (FC_{B-U}) en el carril de diseño a una confiabilidad del 50 % se muestra en la Ecuación 502-07, este tipo de deterioro está asociado al daño por fatiga de grietas en la dirección de abajo hacia arriba (NCHRP, 2004).

$$FC_{B-U} = \left(\frac{6000}{1 + e^{(C_1 * C'_1 + C_2 * C''_2 * \log(D_B * 100))}} \right) * \left(\frac{1}{60} \right) \quad \text{Ec. 502-07}$$

Donde,

$FC_{B-U} =$	Agrietamiento de abajo hacia arriba por fatiga, porcentaje por área de carril en porcentaje.
$D_B =$	Daño por fatiga de abajo hacia arriba, en decimal.
$C'_1 =$	$-2 * C''_2$
$C''_2 =$	$-2,40874 - 39,748(1 + h_{AC})^{-2,856}$

Factores locales para Costa Rica

- C_1 : 4,0
- C_2 : 3,7969

502.02 Grietas longitudinales

En la Ecuación 502-08 se muestra la ecuación para determinar la longitud de grietas longitudinales al 50 % de confiabilidad. Este tipo de deterioro está asociado a grietas que se forman en la dirección de arriba hacia abajo (NCHRP, 2004).

$$FC_{Top-D} = 10,56 \left(\frac{C_4}{1 + e^{(C_1 \times B_1 - C_2 \times B_2 \times \text{Log}(D_{Top} \times 100))}} \right) \quad \text{Ec. 502-08}$$

Donde,

- FC_{Top} = Longitud de grietas longitudinales que inician en la superficie de la MAC en pies/milla (ft/mi).
- D_{Top} = Daño por fatiga de arriba hacia abajo, en decimal.
- C_1 = 7,00
- C_2 = 3,50
- C_4 = 1000

Factores locales para Costa Rica

- $B_1 = 1,3637$
- $B_2 = 0,9881$

Nota: Los factores B_1 y B_2 , permiten obtener el mismo nivel de deterioro del modelo original de la AASHTOWare ME (AASHTO, 2015), pero utilizando la ecuación de N_f , calibrada para Costa Rica.

SECCIÓN 503 FATIGA EN BASES ESTABILIZADAS CON CEMENTO

En el caso de los pavimentos semirrígidos, el desempeño se rige por el agrietamiento por fatiga en la capa de base estabilizada y no por el agrietamiento en la capa de mezcla asfáltica; sin embargo, ambos valores deberán ser estimados y mostrados en la memoria de cálculo.

En la Ecuación 503-01 se presenta un modelo de la Portland Cement Association (PCA, por sus siglas en inglés) que permite estimar la vida a fatiga de una base estabilizada con cemento (Scullion, Jacob, Stacy, & Chen, 2008). En este caso el modelo brinda la cantidad de repeticiones necesarias para alcanzar el daño por fatiga, por lo tanto, este valor debe compararse con la cantidad final de ejes equivalentes en el periodo de diseño.

$$N_f = \left(\frac{\beta_{c4}}{\sigma_t / M_{rup}} \right)^{\beta_{c3} \times 20} \quad \text{Ec. 503-01}$$

Donde,

- N_f = Número de repeticiones de carga para el agrietamiento por fatiga de la base estabilizada.
- σ_t = Máximo esfuerzo a tensión inducido por el tráfico en la parte inferior de la capa de base estabilizada (psi).

- MR*: Módulo de ruptura a los 28 días (resistencia a flexión).
 $\beta_{c3,c4}$ = Factores de calibración en campo (psi).
 $\beta_{c3} = 1,0259$ y $\beta_{c4} = 1,1368$, para granular.
 $\beta_{c3} = 0,6052$ y $\beta_{c4} = 2,1154$, para material fino.

SECCIÓN 504 CONFIABILIDAD EN MODELOS DE DESEMPEÑO

504.01 Ahuellamiento

El ahuellamiento total puede calcularse como la deformación acumulada en cada capa más la sumatoria de errores estándar al nivel de confianza deseado (AASHTO, 2015).

$$\delta_{total} = \delta_{MAC} + \delta_{Base} + \delta_{Subbase} + \delta_{SR} + (Se_{MAC} + Se_{Base} + Se_{Subbase} + Se_{Suelo}) * Z_p \quad \text{Ec. 504-01}$$

$$Se_{MAC} = 0,24 * \delta_{MAC}^{0,8026} + 0,001 \quad \text{Ec. 504-02}$$

$$Se_{Granular} = 0,1235 * \delta_{Granular}^{0,5012} + 0,001 \quad \text{Ec. 504-03}$$

$$Se_{Suelo} = 0,1477 * \delta_{Suelo}^{0,6711} + 0,001 \quad \text{Ec. 504-04}$$

Donde,

- Se_{MAC} = Error estándar para mezcla asfáltica.
 $Se_{Granular}$ = Error estándar para materiales granulares, como bases y subbases.
 Se_{Suelo} = Error estándar para materiales suelos finos.
 Z_p = Valor de "z" de la distribución normal estándar para el nivel de confianza definido.

504.02 Área agrietada

El error estándar asociado al porcentaje de área agrietada se obtiene a partir de la Ecuación 504-05 (NCHRP, 2004) o la Ecuación 504-06.

$$S_{eFC_{B-U}} = 0,5 + \frac{12}{1 + e^{1,308 - 2,949 \text{ Log}(D*100)}} \quad \text{Ec. 504-05}$$

$$S_{eFC_{B-U}} = 1,13 + \frac{13}{1 + e^{7,57 - 15,5 \text{ Log}(FC_{B-U} + 0,0001)}} \quad \text{Ec. 504-06}$$

Donde,

- $S_{eFC_{B-U}}$ = Error estándar agrietamiento de abajo hacia arriba por fatiga.

Por lo tanto, para estimar el porcentaje de área agrietada al nivel de confianza deseado se utiliza la Ecuación 504-07

$$FC_{B-U} - P = FC_{B-U} + S_{eFC_{B-U}} * Z_p \quad \text{Ec. 504-07}$$

Donde,

- $FC_{B-U} - P =$ Agrietamiento de abajo hacia arriba por fatiga, porcentaje por área de carril, ajustado a nivel de confianza del Proyecto.
- $FC_{B-U} =$ Agrietamiento de abajo hacia arriba por fatiga, porcentaje por área de carril, al 50 % de confiabilidad.
- $S_{eFC_{B-U}} =$ Error estándar agrietamiento de abajo hacia arriba por fatiga.
- $Z_p =$ Valor de “z” de la distribución normal estándar para el nivel de confianza definido.

504.03 Grieta longitudinal

Para estimar el error estándar en el caso del deterioro asociado a grietas longitudinales se utiliza la siguiente ecuación. Es muy importante limitar el valor máximo de este error a 700 ft/milla (NCHRP, (2006))

$$S_{eFC_{Top-D}} = 165,68 * \text{Log}(D_{Top} * 100) + 542,53 \quad \text{Ec. 504-08}$$

Donde,

- $S_{eFC_{Top-D}} =$ Error estándar agrietamiento de abajo hacia arriba por fatiga.
- $S_{eFC_{Top-D}} =$ limitado a 700 ft/mi (aproximadamente 133 m/km).

$$FC_{Top-D} - P = FC_{Top-D} + S_{eFC_{Top-D}} * Z_p \quad \text{Ec. 504-09}$$

Donde,

- $FC_{Top-D} - P =$ Longitud de grietas longitudinales que inician en la superficie de la MAC en pies/milla (ft/mi), ajustado a nivel de confianza del Proyecto.
- $FC_{Top-D} =$ Longitud de grietas longitudinales que inician en la superficie de la MAC en pies/milla (ft/mi), al 50 % de confiabilidad.
- $S_{eFC_{Top-D}} =$ Error estándar agrietamiento de arriba hacia abajo.
- $Z_p =$ Valor de “z” de la distribución normal estándar para el nivel de confianza definido.

SECCIÓN 505 NOTAS SOBRE LA VERIFICACIÓN DEL DISEÑO

La verificación mecánica empírica de la estructura es el procedimiento de diseño por el cual, se optimizan los espesores obtenidos en el diseño preliminar. En dicho proceso se verifica la estructura inicial y se realizan modificaciones posteriores en los espesores y materiales, con el objetivo de garantizar que la estructura final, cumpla con los umbrales establecidos en la Tabla 102-03 Criterios de desempeño para porcentaje de área agrietada, Tabla 102-04 Criterios de desempeño para grietas longitudinales en el carril de diseño y Tabla 102-05 Criterios de desempeño ahuellamiento total acumulado. Además, se recomienda iniciar con un diseño en flexible y avanzar hacia un diseño semirrígido en caso de necesitar una estructura de mayor capacidad.

505.01 Verificación inicial

- El diseño inicial, como se mencionó en líneas anteriores, podrá ser estimado de forma tradicional con base en AASHTO-93.
- En las categorías 2 y 1 de diseño se recomienda utilizar modelos constitutivos para materiales granulares y/o suelos, con el objetivo de tomar en cuenta el estado de esfuerzos del material en la estructura de pavimento. Se debe aclarar que para la categoría 2 de diseño se podrían utilizar modelos constitutivos regionales o propios del Proyecto, para la categoría 1 se recomienda utilizar posibles materiales de la zona y realizar el respectivo ensayo de módulo resiliente.
- En el caso de utilizar modelos constitutivos se debe realizar un proceso de verificación para garantizar que el módulo ingresado en la modelación por multicapa elástica corresponde a los módulos que brindan los modelos a partir del estado de esfuerzos de dicha estructura. Para dicho propósito se puede utilizar el criterio de error inferior al 10 % entre el módulo modelado y el módulo predicho por el modelo constitutivo y realizar las modelaciones de calibración junto con un eje simple sencillo.
- Luego de realizar el análisis estructural del pavimento se debe comprobar que los esfuerzos y deformaciones unitarias no superen la capacidad del diseño.
- Con la deformación en la fibra inferior de la capa asfáltica se evalúa la susceptibilidad a agrietamiento por fatiga de abajo hacia arriba (área agrietada tipo cuero de lagarto).

- Con la deformación unitaria en la fibra superior de la capa asfáltica se evalúa la susceptibilidad a agrietamiento por fatiga de arriba hacia abajo (área agrietada tipo grietas longitudinales)
- Con la deformación unitaria a compresión en la zona media de la carpeta asfáltica se evalúa la capacidad de ahuellamiento y deformación permanente de la MAC.
- Con las deformaciones unitarias a compresión en las capas granulares se evalúa la deformación permanente en las bases y subbases.
- Con las deformaciones unitarias a compresión sobre la subrasante y a 6 in (15,2 cm) de profundidad se puede estimar el potencial de ahuellamiento de la subrasante.
- Se debe contemplar estimar los errores estándar para cada tipo de deterioro.
- Posterior a la estimación de la vida a fatiga de la estructura se debe estimar el daño inducido para cada año de operación de la estructura y con dicho parámetro, estimar la longitud de grietas longitudinales o porcentaje de área agrietada y ahuellamiento y compararlos con los umbrales definidos al nivel de confianza requerido.
- En el Anexo C Ejemplos de diseño, pueden observarse algunos ejemplos de diseño.

505.02 Iteraciones posteriores

Si la estructura de diseño no cumple con los parámetros recomendados se deben realizar modificaciones al pavimento.

Pueden modificarse los espesores de las capas siguiendo las siguientes recomendaciones.

- (1) Si la estructura falla por daño a fatiga, pero cumple por ahuellamiento, aumentar el espesor de MAC en intervalos de 1 cm.
- (2) Si la estructura cumple con fatiga (área agrietada y longitud de grietas) pero excede el ahuellamiento máximo permitido, reforzar las capas de base y subbase. Si la solución no converge, debería evaluarse mejorar las condiciones de la base y subbase, ya que podría ser necesario contar con un material más competente.
- (3) Si la solución sigue sin converger, podría tenerse una condición de subrasante blanda ($CBR < 5 \%$ y/o $M_R < 6000$ psi), por lo que debería considerarse un posible mejoramiento o sustitución de material.
- (4) En el caso de iniciar con pavimento flexible y no hallar una estructura que cumple deberá evaluarse el diseño nuevamente, utilizando una base estabilizada, bajo esta

condición también deberá evaluarse el cumplimiento por fatiga en la base estabilizada, según Sección 503 Fatiga en Bases Estabilizadas con Cemento.

- (5) Recomendaciones adicionales se muestran en el Anexo E.2. Recomendaciones para el diseño ME.

REFERENCIAS

- AASHTO. (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*. Washington, DC: AASHTO.
- Aguiar, J. P., Camacho, E., Arias, E. E., & Loria, L. G. (2017). *Effect of Moisture on Full Scale Pavement Distress*.
- Allen J, J., Vargas S, C., & Arias B, E. (2020). *Determinación de los Factores Camión Asociados a Encuestas de Carga y Estaciones de Pesaje en Costa Rica en el Periodo 2007-2017*. San José: LanammeUCR.
- Allen, J., Ulloa, Á., Sibaja, D., & Badilla, G. (2007). *Determinación de factores de los factores camión en Costa Rica*. San José, Costa Rica.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2015). *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide - A Manual of Practice (2nd Edition)*. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). *Design of Pavement Structures*. Washington, DC.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*. Washington, D.C.
- Arias, E. (2020). *Propuesta Guía de Diseño Mecánica-Empírica para Pavimentos flexibles y semirrígidos de Costa Rica*. San Pedro: Universidad de Costa Rica.
- 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.
- ASTM International. (2011). *D7369 – 11: Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension Test*. United States.
- Badilla, G., & Molina, D. (2009). *Incidencia de las Estaciones de Pesaje Móvil en los Factores Camión en Pavimentos de Costa Rica*. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Unidad de Investigación en Infraestructura Vial, San José, Costa Rica.
- Carranza, F. (2007). *Evaluación del módulo de resiliencia de un suelo de subrasante*. Tesis para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de

- Costa Rica, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, San José.
- Cary, C. E., & Zapata, C. E. (2010). *Enhancement of the Model for Resilient Response of Soils due to Seasonal Environmental Changes Implemented in the M-EPDG*. Tempe: Transportation Research Record.
- 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.
- Elizondo, F., & Jiménez, M. (2013). *Calibración de un modelo para valorar la susceptibilidad al agrietamiento por fatiga de mezclas asfálticas para Costa Rica*. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, San José.
- Elizondo, F., Badilla, G., & Ulloa, Á. (2008). Predicción de módulos resilientes en mezclas asfálticas mediante el modelo de Witczak. *Infraestructural Vial*(19).
- Engar, O. (2018). *A Literature Review on Wheel Wander*. Springfield: IAPA.
- Espinoza, J. C. (2013). *Trabajo Final de Graduación: Determinación de Factores Camión y Espectros de Carga Representativos de Autobuses Urbanos e Interurbanos para Diseño de Pavimentos Flexibles de Costa Rica . (Tesis inédita de licenciatura)*. Universidad de Costa Rica. San Pedro.
- Harman, T., D'Angelo, J., & Bukowski, J. (1999). *Superpave Asphalt Mixture Design Workshop Workbook*. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, DC.
- Herrera, V. (2007). *Valoración del módulo resiliente para un suelo utilizado como subrasante*. Tesis para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil, San José.
- Instituto Mexicano del Transporte. (2001). *Módulos de resiliencia en suelos finos y materiales granulares*. Sanfandila: Secretaría de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte.
- 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. (2013). *IMoDin: Interfaz gráfica del cálculo del Módulo Dinámico*.

- Retrieved from <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/index.php/centro-de-descarga/programas/i-modin.html>
- LanammeUCR. (2016). *Fotografía contador de Radar*. Retrieved from Base de datos UGM LanammeUCR
- LanammeUCR. (2018). *Primer Ensayo Acelerado de Pavimentos a Escala Natural, LM-PI-UMP-088-R1*. San Pedro : LanammeUCR.
- Leiva Padilla, P., Aguiar, J. P., Leiva, F., & Loría, L. G. (2013). *Herramienta de cálculo de la Curva Maestra de Módulo Dinámico*. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Unidad de Materiales y Pavimentos, San José.
- Leiva, F., Loria, L., & Aguiar, J. P. (2013). *Development of an improved and more effective dynamic modulus E^* model for mixtures in Costa Rica by means of artificial neural networks*. Washington D.C.: 92th Annual Meeting of the Transportation Research Board.
- 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 (2016). *Manual de Auscultación Visual de Pavimentos de Costa Rica MAV-2016*, República de Costa Rica.
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Costa Rica. (2010). *Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos, Carreteras y Puentes CR-2010*. República de Costa Rica.
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Costa Rica. (2020). *Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos, Carreteras y Puentes CR-2020*. República 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.
- Mohs, C. (2008). *Variación del módulo de resiliencia de suelos de subrasante según el contenido de humedad y el grado de compactación*. Tesis para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, San José.
- National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). (2006). *Changes to the*

- Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*. Washington, DC: NCHRP.
Recuperado el 15 de octubre, 2019, de
<http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/mepdg/DraftDigest.pdf>
- National Cooperative Highway Research Program. (2004). *Guide for Mechanistic-Empirical Design Guide of New and Rehabilitated Pavement Structures*. National Research Council, Transportation Research Program, Illinois.
- National Cooperative Highway Research Program. (2004). *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*. Illinois: NCHRP.
- National Cooperative Highway Research Program. (2004). Research Results Digest 285. Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design.
- Orozco, E. O. (2007). *Zonificación Climática de Costa Rica Para la Gestión de Infraestructura Vial*. Trabajo Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José.
- Porras, J. D. (2009). *Determinación de rangos de módulos resilientes para materiales constituyentes de la estructura de pavimentos existentes en Costa Rica, mediante el procedimiento de retrocálculo de módulos y ensayos dinámicos*. Tesis para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, San José.
- Ramírez, D. (2013). *Comparación de propiedades mecánicas de esfuerzo-deformación de un suelo arcilloso de subrasante*. Universidad de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, San José.
- Scullion, T., Jacob, U., Stacy, H., & Chen, P. (2008). *Thickness Design Systems for Pavements Containing Soil-Cement Bases*. Illinois: Portland Cement Association.
- Texas Department of Transportation. (2012). *Traffic Recorder Instruction Manual*. Austin: Texas Department of Transportation.
- Vargas, C., & Allen, J. (2014). *Determinación de los factores camión promedio en estaciones de pesaje en Costa Rica: Periodo 2008 - 2011*. San Pedro.
- Zuñiga, J. C. (2017). *Anuario de Información de Tránsito 2017*. San José: Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Costa Rica.

ANEXOS

ANEXO A MODELOS CONSTITUTIVOS

Anexo A.1 Modelos de módulo resiliente para suelos

Clasificación SUCS

- Suelos ML

Tabla A1-01

Modelos constitutivos para suelos ML, 2007

Fórmulas	Condiciones
$M_R = 4799,2 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,063} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{0,035}$	Saturación prueba: 57,6 % Saturación compactación: 57,7 %
$M_R = 4050,6 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,231} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-0,139}$	Saturación prueba: 73,3 % Saturación compactación: 72,7 %
$M_R = 3005,0 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,044} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-0,188}$	Saturación prueba: 100 %, Saturación compactación: 76,2 %
$M_R = 3354,2 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,097} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{0,083}$	Saturación prueba: 86,5 % Saturación compactación: 86,8 %
$M_R = 3507,7 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,083} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-0,266}$	Saturación prueba: 100 % Saturación compactación: 89,1 %
<p>Donde,</p> <p>M_R = Módulo resiliente (kPa)</p> <p>P_a = Presión atmosférica, 88,38 kPa (promedio para San José)</p> <p>θ = Esfuerzo total ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$) (kPa), con:</p> <p>$\sigma_1$ = Esfuerzo principal mayor</p> <p>σ_2 = Esfuerzo principal intermedio</p> <p>σ_3 = Esfuerzo principal menor o esfuerzo de confinamiento</p> <p>τ_{oct} = Esfuerzo cortante octaédrico (kPa)</p> $\tau_{oct} = \frac{1}{3} * \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$	

Adaptado de Herrera, 2007.

Tabla A1-02

Modelos constitutivos para suelos ML, 2008

Fórmulas	Condiciones
$M_R = 1230,7 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{-0,336} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{1,823}$	Humedad (seca): 7,29 %
$M_R = 116,8 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,186} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-2,289}$	Humedad (óptima): 21,80 %
$M_R = 559,2 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,313} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-2,774}$	Humedad (saturada): 26,83 %
$M_R = 1143,8 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{-0,227} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{1,287}$	Humedad (seca): 7,47 %
$M_R = 951,3 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,226} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-1,690}$	Humedad (óptima): 21,68 %
$M_R = 413,3 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,232} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-2,156}$	Humedad (saturada): 27,66 %
$M_R = 941,1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{-0,058} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{0,992}$	Humedad (seca): 6,87 %
$M_R = 981,8 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,329} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-2,904}$	Humedad (óptima): 21,60 %
<p>Donde,</p> <p>M_R = Módulo resiliente (kPa)</p> <p>P_a = Presión atmosférica, 88,38 kPa (promedio para San José)</p> <p>θ = Esfuerzo total ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$) (kPa), con:</p> <p style="padding-left: 40px;">σ_1 = Esfuerzo principal mayor</p> <p style="padding-left: 40px;">σ_2 = Esfuerzo principal intermedio</p> <p style="padding-left: 40px;">σ_3 = Esfuerzo principal menor o esfuerzo de confinamiento</p> <p>τ_{oct} = Esfuerzo cortante octaédrico (kPa)</p> $\tau_{oct} = \frac{1}{3} * \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$	

Adaptado de Mohs, 2008.

- Suelos CH

Tabla A1-03

Modelos constitutivos para suelos CH, 2013

Fórmula	Condiciones
$M_R = 0,41 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,151} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-1,643}$	Humedad óptima: 45 % Densidad seca: 990 kg/m ³
Donde, M_R = Módulo resiliente (MPa) P_a = Presión atmosférica, 88,38 kPa (promedio para San José) θ = Esfuerzo total ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$) (kPa), con: σ_1 = Esfuerzo principal mayor σ_2 = Esfuerzo principal intermedio σ_3 = Esfuerzo principal menor o esfuerzo de confinamiento τ_{oct} = Esfuerzo cortante octaédrico (kPa) $\tau_{oct} = \frac{1}{3} * \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$	

Adaptado de Ramírez, 2013.

- Suelos MH

Tabla A1-04

Modelos constitutivos para suelos MH, 2008

Fórmula	Condiciones
$M_R = 1177,8 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,047} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{0,881}$	Humedad (seca): 13,73 %
$M_R = 1257,4 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,145} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-0,389}$	Humedad (óptima): 32,45 %
$M_R = 802,4 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,209} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-1,794}$	Humedad (saturada): 35,74 %
$M_R = 1126,8 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,101} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{0,026}$	Humedad (seca): 11,50 %
$M_R = 1032,2 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,214} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-0,767}$	Humedad (óptima): 32,71 %
$M_R = 934,9 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,198} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-3,306}$	Humedad (saturada): 38,06 %

Fórmula	Condiciones
$M_R = 796,2 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{-0,368} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-1,963}$	Humedad (seca): 9,30 %
$M_R = 935,610 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,190} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-1,480}$	Humedad (óptima): 32,56 %
$M_R = 809,990 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,317} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-2,619}$	Humedad (saturada): 41,32 %
<p>Donde,</p> <p>M_R = Módulo resiliente (kPa) P_a = Presión atmosférica, 88,38 kPa (promedio para San José) θ = Esfuerzo total ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$) (kPa), con: σ_1 = Esfuerzo principal mayor σ_2 = Esfuerzo principal intermedio σ_3 = Esfuerzo principal menor o esfuerzo de confinamiento τ_{oct} = Esfuerzo cortante octaédrico (kPa)</p> $\tau_{oct} = \frac{1}{3} * \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$	

Adaptado de Mohs, 2008.

Tabla A1-05

Modelos constitutivos para suelos MH, 2007

Fórmula	Condiciones
$M_R = k_1 + k_3 * (k_2 - \sigma_d), \text{con } \sigma_d < k_2$ $M_R = k_1 - k_4 * (\sigma_d - k_2), \text{con } \sigma_d > k_2$ $K_1 = \text{kPa}$ $K_2 = \text{kPa}$ $M_R = \text{kPa}$	
<p>Donde,</p> <p>σ_d = Esfuerzo desviador (kPa).</p>	
$29310 + 238,4 * (37,3 - \sigma_d), \text{con } \sigma_d < k_2$ $29310 - 71,6 * (\sigma_d - 37,3), \text{con } \sigma_d > k_2$	Saturación: 100 %, σ_3 :41,4 kPa
$30700 + 148,4 * (37,3 - \sigma_d), \text{con } \sigma_d < k_2$ $30700 - 0 * (\sigma_d - 37,3), \text{con } \sigma_d > k_2$	Saturación: 100 %, σ_3 :27,6 kPa
$31140 + 153,7 * (37,3 - \sigma_d), \text{con } \sigma_d < k_2$ $31140 - 16,1 * (\sigma_d - 37,3), \text{con } \sigma_d > k_2$	Saturación: 100 %, σ_3 :13,8 kPa

Fórmula	Condiciones
$28760 + 261,1 * (37,3 - \sigma_d), \text{con } \sigma_d < k_2$ $28760 - 0 * (\sigma_d - 37,3), \text{con } \sigma_d > k_2$	Saturación: 100 %, σ_3 :41,4 kPa
$27980 + 173,8 * (37,3 - \sigma_d), \text{con } \sigma_d < k_2$ $27980 - 21,6 * (\sigma_d - 37,3), \text{con } \sigma_d > k_2$	Saturación: 100 %, σ_3 :27,6 kPa
$M_R = k_5 * \sigma_d^{k_6}$	
Donde, σ_d = Esfuerzo desviador (kPa). M_R = Módulo resiliente (MPa).	
Fórmula	Condiciones
$M_R = 43,5 * \sigma_d^{-0,092}$	Saturación: 100 %, σ_3 :41,4 kPa
$M_R = 39,1 * \sigma_d^{-0,062}$	Saturación: 100 %, σ_3 :27,6 kPa
$M_R = 40,3 * \sigma_d^{-0,071}$	Saturación: 100 %, σ_3 :13,8 kPa
$M_R = 49,1 * \sigma_d^{-0,136}$	Saturación: 100 %, σ_3 :27,6 kPa
$M_R = 37,9 * \sigma_d^{-0,074}$	Saturación: 100 %, σ_3 :13,8 kPa

Adaptado de Carranza, 2007.

Clasificación AASHTO

- Suelos A-4

Tabla A1-06

Modelos constitutivos para suelos A-4, 2008

Fórmula	Condiciones
$M_R = 1230,7 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{-0,336} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{1,823}$	Humedad (seca): 7,29 %
$M_R = 1163,8 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,186} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-2,289}$	Humedad (óptima): 21,80 %
$M_R = 559,2 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,313} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-2,774}$	Humedad (saturada): 26,83 %

Fórmula	Condiciones
$M_R = 1143,8 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{-0,227} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{1,287}$	Humedad (seca): 7,47 %
$M_R = 951,3 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,226} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-1,690}$	Humedad (óptima): 21,68 %
$M_R = 413,3 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,232} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-2,156}$	Humedad (saturada): 27,66 %
$M_R = 941,1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{-0,058} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{0,992}$	Humedad (seca): 6,87 %
$M_R = 981,8 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,329} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-2,904}$	Humedad (óptima): 21,60 %
<p>Donde,</p> <p>M_R = Módulo resiliente (kPa)</p> <p>P_a = Presión atmosférica, 88,38 kPa (promedio para San José)</p> <p>θ = Esfuerzo total ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$) (kPa), con:</p> <p style="padding-left: 40px;">σ_1 = Esfuerzo principal mayor</p> <p style="padding-left: 40px;">σ_2 = Esfuerzo principal intermedio</p> <p style="padding-left: 40px;">σ_3 = Esfuerzo principal menor o esfuerzo de confinamiento</p> <p>τ_{oct} = Esfuerzo cortante octaédrico (kPa)</p> $\tau_{oct} = \frac{1}{3} * \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$	

Adaptado de Mohs, 2008.

- Suelos A-5

Tabla A1-07

Modelos constitutivos para suelos A-5, 2007

Fórmulas	Condiciones
$M_R = 4799,2 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,063} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{0,035}$	Saturación prueba: 57,6 % Saturación compactación: 57,7 %
$M_R = 4050,6 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,231} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-0,139}$	Saturación prueba: 73,3 % Saturación compactación: 72,7 %

Fórmulas	Condiciones
$M_R = 3005,0 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,044} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-0,188}$	Saturación prueba: 100 %, Saturación compactación: 76,2 %
$M_R = 3354,2 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,097} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{0,083}$	Saturación prueba: 86,5 %, Saturación compactación: 86,8 %
$M_R = 3507,7 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,083} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-0,266}$	Saturación prueba: 100 %, Saturación compactación: 89,1 %
<p>Donde,</p> <p>M_R = Módulo resiliente (kPa)</p> <p>P_a = Presión atmosférica, 88,38 kPa (promedio para San José)</p> <p>θ = Esfuerzo total ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$) (kPa), con:</p> <p>$\sigma_1$ = Esfuerzo principal mayor</p> <p>σ_2 = Esfuerzo principal intermedio</p> <p>σ_3 = Esfuerzo principal menor o esfuerzo de confinamiento</p> <p>τ_{oct} = Esfuerzo cortante octaédrico (kPa)</p> $\tau_{oct} = \frac{1}{3} * \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$	

Adaptado de Herrera, 2007.

- Suelos A-7-5

Tabla A1-08

Modelos constitutivos para suelos A-7-5, 2008

Fórmula	Condiciones
$M_R = 1177,8 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,047} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{0,881}$	Humedad (seca): 13,73 %
$M_R = 1257,4 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,145} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-0,389}$	Humedad (óptima): 32,45 %
$M_R = 802,4 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,209} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-1,794}$	Humedad (saturada): 35,74 %
$M_R = 1126,8 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,101} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{0,026}$	Humedad (seca): 11,50 %

Fórmula	Condiciones
$M_R = 1032,2 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,214} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-0,767}$	Humedad (óptima): 32,71 %
$M_R = 934,9 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,198} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-3,306}$	Humedad (saturada): 38,06 %
$M_R = 796,2 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{-0,368} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-1,963}$	Humedad (seca): 9,30 %
$M_R = 935,610 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,190} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-1,480}$	Humedad (óptima): 32,56 %
$M_R = 809,990 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,317} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-2,619}$	Humedad (saturada): 41,32 %
<p>Donde,</p> <p>M_R = Módulo resiliente (kPa)</p> <p>P_a = Presión atmosférica, 88,38 kPa (promedio para San José)</p> <p>θ = Esfuerzo total ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$) (kPa), con:</p> <p>$\sigma_1$ = Esfuerzo principal mayor</p> <p>σ_2 = Esfuerzo principal intermedio</p> <p>σ_3 = Esfuerzo principal menor o esfuerzo de confinamiento</p> <p>τ_{oct} = Esfuerzo cortante octaédrico (kPa)</p> $\tau_{oct} = \frac{1}{3} * \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$	

Adaptado de Mohs, 2008.

Tabla A1-09

Modelos constitutivos para suelos CH, 2013

Fórmula	Condiciones
$M_R = 0,41 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,151} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-1,643}$	Humedad óptima: 45 % Densidad seca: 990 kg/m ³
<p>Donde,</p> <p>M_R = Módulo resiliente (MPa)</p> <p>P_a = Presión atmosférica, 88,38 kPa (promedio para San José)</p> <p>θ = Esfuerzo total ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$) (kPa), con:</p> <p>$\sigma_1$ = Esfuerzo principal mayor</p> <p>σ_2 = Esfuerzo principal intermedio</p> <p>σ_3 = Esfuerzo principal menor o esfuerzo de confinamiento</p> <p>τ_{oct} = Esfuerzo cortante octaédrico (kPa)</p> $\tau_{oct} = \frac{1}{3} * \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$	

Adaptado de Ramírez, 2013

Tabla A1-10

Modelos constitutivos para suelos A-7-5, 2009

Fórmula	Condiciones
$M_R = 1633,9 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,069} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-1,646}$	Subrasante - $W_{\text{óptima}}$: 34,80 %
$M_R = 1211,4 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,118} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-0,652}$	Subrasante - $W_{\text{óptima}}$: 28,83 %
<p>Donde,</p> <p>M_R = Módulo resiliente (kPa)</p> <p>P_a = Presión atmosférica, 88,38 kPa (promedio para San José)</p> <p>θ = Esfuerzo total ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$) (kPa), con:</p> <p>$\sigma_1$ = Esfuerzo principal mayor</p> <p>σ_2 = Esfuerzo principal intermedio</p> <p>σ_3 = Esfuerzo principal menor o esfuerzo de confinamiento</p> <p>τ_{oct} = Esfuerzo cortante octaédrico (kPa)</p> $\tau_{oct} = \frac{1}{3} * \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$	

Adaptado de Porras, 2009.

Tabla A1-11

Modelos constitutivos para suelos A-7-5, 2009

Fórmula	Condiciones
$M_R = 233964,6 * \sigma_d^{-0,216}$	Subrasante - $W_{\text{óptima}}$: 34,80 %
$M_R = 122019,8 * \sigma_d^{-0,061}$	Subrasante - $W_{\text{óptima}}$: 28,83 %
<p>Donde,</p> <p>M_R = Módulo resiliente (kPa)</p> <p>σ_d = esfuerzo desviador (kPa)</p>	

Adaptado de Porras, 2009.

Tabla A1-12

Modelos constitutivos para suelos A-7-5, 2007

$M_R = k_1 + k_3 * (k_2 - \sigma_d), \text{ con } \sigma_d < k_2$ $M_R = k_1 - k_4 * (\sigma_d - k_2), \text{ con } \sigma_d > k_2$ $K_1 = \text{kPa}$ $K_2 = \text{kPa}$ $K_3 = \text{sin unidades}$ $K_4 = \text{sin unidades}$ $M_R = \text{kPa}$ $\sigma_d = \text{Esfuerzo desviador (kPa)}.$	
Fórmulas	Condiciones
$29310 + 238,4 * (37,3 - \sigma_d), \text{ con } \sigma_d < k_2$ $29310 - 71,6 * (\sigma_d - 37,3), \text{ con } \sigma_d > k_2$	Saturación: 100 %, σ_3 :41,4 kPa
$30700 + 148,4 * (37,3 - \sigma_d), \text{ con } \sigma_d < k_2$ $30700 - 0 * (\sigma_d - 37,3), \text{ con } \sigma_d > k_2$	Saturación: 100 %, σ_3 :27,6 kPa
$31140 + 153,7 * (37,3 - \sigma_d), \text{ con } \sigma_d < k_2$ $31140 - 16,1 * (\sigma_d - 37,3), \text{ con } \sigma_d > k_2$	Saturación: 100 %, σ_3 :13,8 kPa
$28760 + 261,1 * (37,3 - \sigma_d), \text{ con } \sigma_d < k_2$ $28760 - 0 * (\sigma_d - 37,3), \text{ con } \sigma_d > k_2$	Saturación: 100 %, σ_3 :41,4 kPa
$27980 + 173,8 * (37,3 - \sigma_d), \text{ con } \sigma_d < k_2$ $27980 - 21,6 * (\sigma_d - 37,3), \text{ con } \sigma_d > k_2$	Saturación: 100 %, σ_3 :27,6 kPa
$k_5 * \sigma_d^{k_6}$ $\sigma_d = \text{Esfuerzo desviador (kPa)}.$ $M_R = \text{Módulo resiliente (MPa)}.$	
Fórmula	Condiciones
$M_R: 43,5 * \sigma_d^{-0,092}$	Saturación: 100 %, σ_3 :41,4 kPa
$M_R: 39,1 * \sigma_d^{-0,062}$	Saturación: 100 %, σ_3 :27,6 kPa
$M_R: 40,3 * \sigma_d^{-0,071}$	Saturación: 100 %, σ_3 :13,8 kPa
$M_R: 49,1 * \sigma_d^{-0,136}$	Saturación: 100 %, σ_3 :27,6 kPa
$M_R: 37,9 * \sigma_d^{-0,074}$	Saturación: 100 %, σ_3 :13,8 kPa

Adaptado de Carranza, 2007.

- Suelos A-7-6

Tabla A1-13

Modelos constitutivos para suelos A-7-6, 2009

Fórmula	Condiciones
$M_R = 1759,8 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,131} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-1,636}$	Subrasante - $W_{\text{óptima}}$: 21,63 %
<p>Donde:</p> <p>M_R = Módulo resiliente (kPa)</p> <p>P_a = Presión atmosférica, 88,38 kPa (promedio para San José)</p> <p>θ = Esfuerzo total ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$) (kPa), con:</p> <p style="padding-left: 40px;">σ_1 = Esfuerzo principal mayor</p> <p style="padding-left: 40px;">σ_2 = Esfuerzo principal intermedio</p> <p style="padding-left: 40px;">σ_3 = Esfuerzo principal menor o esfuerzo de confinamiento</p> <p>τ_{oct} = Esfuerzo cortante octaédrico (kPa)</p> $\tau_{oct} = \frac{1}{3} * \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$	
Fórmula	Condiciones
$M_R = 238314,2 * \sigma_d^{-0,196}$	Subrasante - $W_{\text{óptima}}$: 21,63 %
<p>Donde:</p> <p>M_R = Módulo resiliente (kPa)</p> <p>σ_d = esfuerzo desviador (kPa)</p>	

Adaptado de Porras, 2009.

Anexo A.2 Modelos de módulo resiliente para materiales granulares

Clasificación AASHTO

- Suelos A-1-a

Tabla A-2-01

Modelos constitutivos para suelos A-1-a, 2009

Fórmula	Condiciones
$M_R = 1059,8 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,482} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-0,049}$	Base - $W_{\text{óptima}}$: 6,41 %
$M_R = 1633,5 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,316} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-0,029}$	Subbase - $W_{\text{óptima}}$: 7,23 %
$M_R = 1635,1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,312} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-0,021}$	Base - $W_{\text{óptima}}$: 6,00 %
$M_R = 1759,4 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,233} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-0,085}$	Relleno - $W_{\text{óptima}}$: 6,70 %
$M_R = 2806,3 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,138} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{-0,056}$	Base - $W_{\text{óptima}}$: 4,39 %
$M_R = 2373,6 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0,168} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{0,004}$	Subbase - $W_{\text{óptima}}$: 5,14 %
<p>Donde:</p> <p>M_R = Módulo resiliente (kPa).</p> <p>P_a = Presión atmosférica, 88,38 kPa (promedio para San José).</p> <p>θ = Esfuerzo total ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$) (kPa), con:</p> <p style="padding-left: 20px;">σ_1 = Esfuerzo principal mayor.</p> <p style="padding-left: 20px;">σ_2 = Esfuerzo principal intermedio.</p> <p style="padding-left: 20px;">σ_3 = Esfuerzo principal menor o esfuerzo de confinamiento.</p> <p>τ_{oct} = Esfuerzo cortante octaédrico (kPa).</p> $\tau_{oct} = \frac{1}{3} * \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$	
Fórmula	Condiciones
$M_R = 12272,4 * \theta^{0,482}$	Base - $W_{\text{óptima}}$: 6,41 %
$M_R = 36154,1 * \theta^{0,308}$	Subbase - $W_{\text{óptima}}$: 7,23 %

Fórmula	Condiciones
$M_R = 39930 * \theta^{0,308}$	Base - $W_{\text{óptima}}$: 6,00 %
$M_R = 65870,3 * \theta^{0,213}$	Relleno - $W_{\text{óptima}}$: 6,70 %
$M_R = 158501,7 * \theta^{0,125}$	Base - $W_{\text{óptima}}$: 4,39 %
$M_R = 110176,8 * \theta^{0,169}$	Subbase - $W_{\text{óptima}}$: 5,14 %
$M_R = \text{kPa.}$ $\theta =$ Suma de los esfuerzos principales ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$) o los esfuerzos normales ($\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$).	

Adaptado de Porras, 2009.

ANEXO B CÁLCULO DEL TMI Y FACTOR DE REDUCCIÓN AMBIENTAL

Anexo B.1 Información para el cálculo del TMI

Tabla B1-01

Precipitación y temperatura promedio, mensual

	Precipitación, mm	Temperatura, °C
Enero	70	20,7
Febrero	85	21,2
Marzo	90	21,6
Abril	120	22,7
Mayo	198	23,4
Junio	247	23,2
Julio	157	22,8
Agosto	211	22,6
Setiembre	361	22,4
Octubre	327	22,3
Noviembre	102	21,5
Diciembre	50	21,0
Suma	2019	

Tabla B1-02
Cálculo de TMI

Mes	Índice de calor	Evapotranspiración mensual, mm	Días del mes	Factor de corrección por mes	Evapotranspiración corregida, mm	Almacenamiento mensual, mm	Exceso mensual, mm	Déficit, mm	TMI
Enero	8,6	72,5	31	1,0	74,9	68,2	0,0	0,0	0,0
Febrero	8,9	77,0	28	0,9	65,4	87,8	0,0	0,0	0,0
Marzo	9,2	80,7	31	1,0	85,9	91,9	0,0	0,0	0,0
Abril	9,9	91,6	30	1,0	94,3	100,0	17,5	0,0	18,6
Mayo	10,3	98,9	31	1,1	110,4	100,0	87,6	0,0	79,4
Junio	10,2	96,8	30	1,1	102,6	100,0	144,8	0,0	141,2
Julio	9,9	92,6	31	1,1	103,3	100,0	54,1	0,0	52,3
Agosto	9,8	90,6	31	1,1	100,1	100,0	110,8	0,0	110,6
Setiembre	9,7	88,5	30	1,0	90,3	100,0	270,2	0,0	299,2
Octubre	9,6	87,5	31	1,0	92,3	100,0	234,8	0,0	254,5
Noviembre	9,1	79,8	30	1,0	78,2	100,0	24,2	0,0	30,9
Diciembre	8,8	75,2	31	1,0	76,9	73,1	0,0	0,0	0,0
Suma	114,1					68,2			
Constante a	2,5347								

Nota:

(1) El almacenamiento mensual de enero debe resolverse de forma iterativa, para completar un ciclo completo.

Anexo B.2 Subrasante fina (suelos plásticos)

Tabla B2-01

Cálculo del factor de reducción ambiental para suelos finos

Mes	TMI	Succión mensual (kPa)	Succión mensual (psi)	Saturación, %	log FU	FU
Enero	0,000	175,838	25,503	80,990	0,170	1,481
Febrero	0,000	175,838	25,503	80,990	0,170	1,481
Marzo	0,000	175,838	25,503	80,990	0,170	1,481
Abril	18,576	93,094	13,502	88,348	0,002	1,004
Mayo	79,376	28,497	4,133	96,058	-0,183	0,655
Junio	141,160	17,382	2,521	97,588	-0,221	0,602
Julio	52,299	42,475	6,161	94,215	-0,139	0,727
Agosto	110,624	21,067	3,056	97,075	-0,208	0,619
Setiembre	299,159	11,956	1,734	98,351	-0,239	0,576
Octubre	254,491	12,621	1,831	98,257	-0,237	0,579
Noviembre	30,935	66,635	9,665	91,261	-0,067	0,856
Diciembre	0,000	175,838	25,503	80,990	0,170	1,481
P200	PI	wPI	ywater (pcf)			
80	24	19,2	62,428			

Tabla B2-02

Parámetros de referencia suelos finos

Para materiales plásticos, wpi > 0					
af, psi	cf	bf/cf	hr/af, u	hr, upsi	bf
23,244	0,703	1,502	46,363	1077,693	1,056
sopt	wopt	Gs	Yd max comp	cita opt	Porosidad
88,425	22,240	2,747	101,411	36,127	40,856

Anexo B.3 Subrasante gruesa (suelos no plásticos)

Tabla B3-01

Cálculo del factor de reducción ambiental para suelos tipo arenas

	TMI	Succión mensual (kPa)	Succión mensual (psi)	Saturación %	log FU	FU
Enero	0,000	8,771	1,272	16,106	0,241	1,742
Febrero	0,000	8,771	1,272	62,652	0,057	1,140
Marzo	0,000	8,771	1,272	62,652	0,057	1,140
Abril	18,576	7,825	1,135	65,901	0,044	1,108
Mayo	79,376	6,975	1,012	69,536	0,031	1,074
Junio	141,160	6,887	0,999	69,965	0,029	1,070
Julio	52,299	7,147	1,037	68,734	0,034	1,081
Agosto	110,624	6,908	1,002	69,863	0,030	1,071
Setiembre	299,159	6,877	0,997	70,014	0,029	1,069
Octubre	254,491	6,877	0,997	70,013	0,029	1,069
Noviembre	30,935	7,475	1,084	67,300	0,039	1,095
Diciembre	0,000	8,771	1,272	62,652	0,057	1,140
P200	D60 (mm) *	wPI	P4	P40	ywater (pcf)	Contenido volumétrico de agua saturado
6	0,5	0	36,5	8,5	62,428	1,000

Nota:

(1) el valor de D60 debe estar en el rango entre 0,1 y 1 mm

Tabla B3-02

Parámetros de referencia arenas

Para materiales granulares no plásticos, wpi = 0				
af, psi	cf	hr/af, u	hr, upsi	bf
0,211	0,651	1,476	0,311	7,500
Sopt	woptt99	Wopt		
78,000	9,287	9,287		
g	Gs			
0,343	2,906			
yd max comp (pcf)	θopt			
134,785	20,052			
Sopt				
78,000				

ANEXO C: EJEMPLOS DE DISEÑO

En los siguientes apartados se brindan ejemplos de cálculo que pretenden mostrar la forma de aplicar el procedimiento expuesto anteriormente y las circunstancias particulares que pueden darse durante su aplicación.

Anexo C.1 Ejemplo de diseño categoría 3

Tabla C1-01

Ejemplos de diseño categoría 3: Datos del Proyecto

Información general del Proyecto	Información de los materiales
Ubicación del Proyecto: Cartago	
Periodo de diseño: 15 años	CBR subrasante: 5 %
TPDA: 2400	Tipo de suelo de a subrasante: MH
Distribución vehicular:	CBR de la base: 80 %
Liviano: 89,19 %	CBR de la subbase: 30 %
Motos: 6,46 %	Características de la mezcla: resultados del
C2: 1,06 %	ensayo ASTM D7369 – 11 “ <i>Standard Test</i>
C2+: 0,9 %	<i>Method for Determining the Resilient Modulus</i>
C2 Bus: 0,7 %	<i>of Bituminous Mixtures by Indirect Tension</i>
C3: 1,14 %	<i>Test</i> ”
T3-S2: 0.55 %	

i. Estimación inicial con AASTHO-93

- (a) Módulo de la mezcla asumido: 450 000 psi.
- (b) Factor direccional: 0,5.
- (c) Factor por carril: Con un carril por sentido $DL= 1$.
- (d) Factor de crecimiento: Con un porcentaje de crecimiento igual a 4 % (*Ecuación 202-08*):

$$GF = \frac{|(1+r)^n - 1|}{r} = \frac{|(1+4\%)^{15} - 1|}{4\%} = 20,02$$

- (e) Factor camión: Según encuesta de carga del 2007

Tabla C1-02

Ejemplo de diseño categoría 3: Factores camión

Ruta	Tipo de vehículo					
	Pickup	C2+	C2	Bus-C2	C3	T3-S2
Ruta 2 - Florencio del Castillo	0,0133	0,107	0,4	2,73	1,414	2,098

(f) Ejes equivalentes de diseño (Ecuación 202-01)

$$ESAL_{día} = \%vehículo * TPDA * FC$$

$$ESAL_{día} = (89,19\% * 0,0133 + 0,9\% * 0,107 + 1,06\% * 0,4 + 0,7\% * 2,73 + 1,14\% * 1,414 + 0,55\% * 2,098) * 2400$$

$$ESAL_{día} = 153,20 \approx 153$$

$$ESAL_{diseño} = ESAL_{día} * 365 * GF * DL * LDF$$

$$ESAL_{diseño} = 153 * 365 * 20.02 * 1 * 0,5 = 559 844$$

(g) Nivel de análisis: $ESAL_{diseño} = 559 844 < 3$ millones, categoría 3 (Tabla 102-01 Niveles jerárquicos de diseño según la cantidad de ESAL's).

(h) Estimación de los coeficientes estructurales:

- i. Subrasante. Utilizando la ecuación recomendada para suelos de grano fino, el módulo resiliente se estima como:

$$M_R = 1500 * CBR = 1500 * 5 = 7 500 \text{ psi}$$

Para este ejemplo se supone un valor de CBR de 5, pero para cada Proyecto en específico deben realizarse ensayos con el material extraído de campo.

- ii. Base granular. Con un CBR igual a 80 % (valor mínimo recomendado para bases granular por el CR-2020) y la Figura C1-01 Nomograma de módulo resiliente para una base granular se obtiene un a_2 de 0,135.

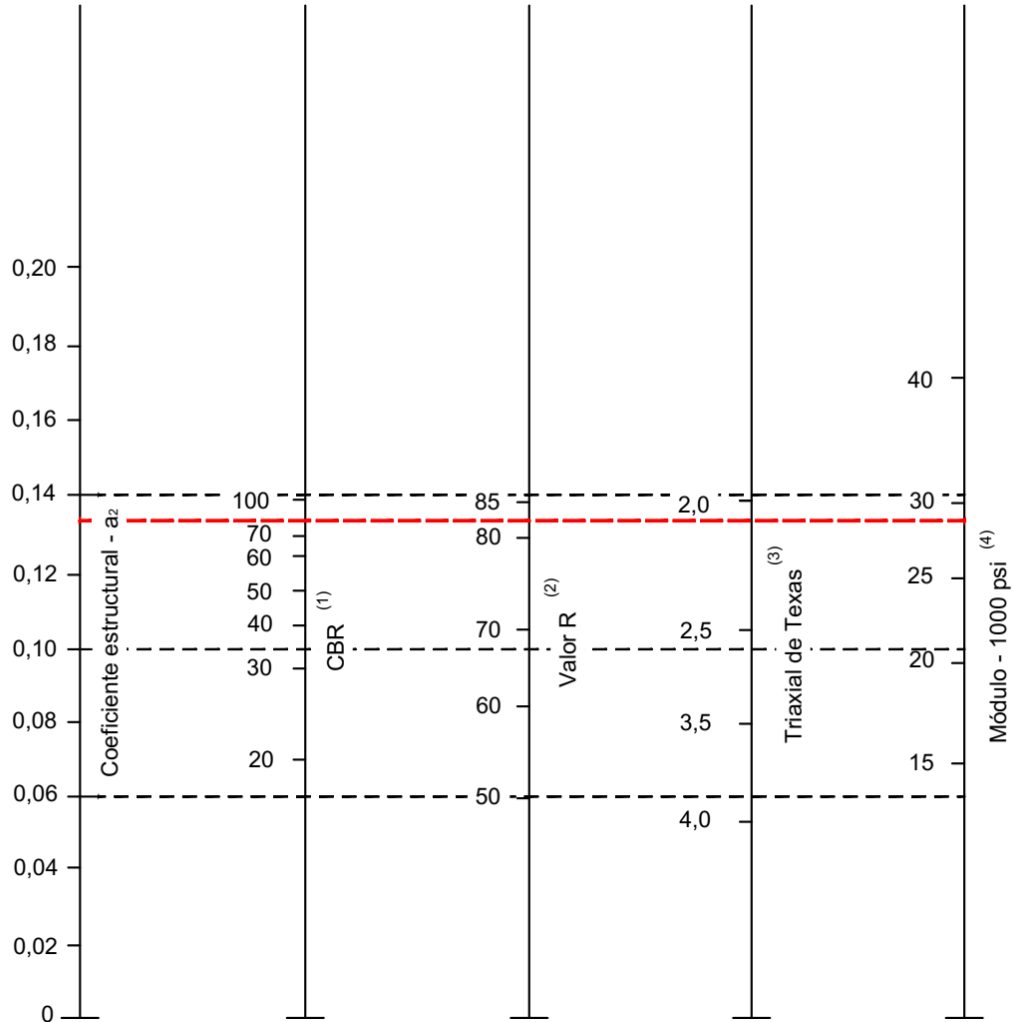


Figura C1-01

Nomograma de módulo resiliente para una base granular

- iii. Subbase granular. Con un CBR = 30 % (valor mínimo recomendado para subbases granular por el CR-2020) y utilizando la Figura C1-02 Nomograma de módulo resiliente para una subbase granular se obtiene un coeficiente estructural a_3 de 0,11.

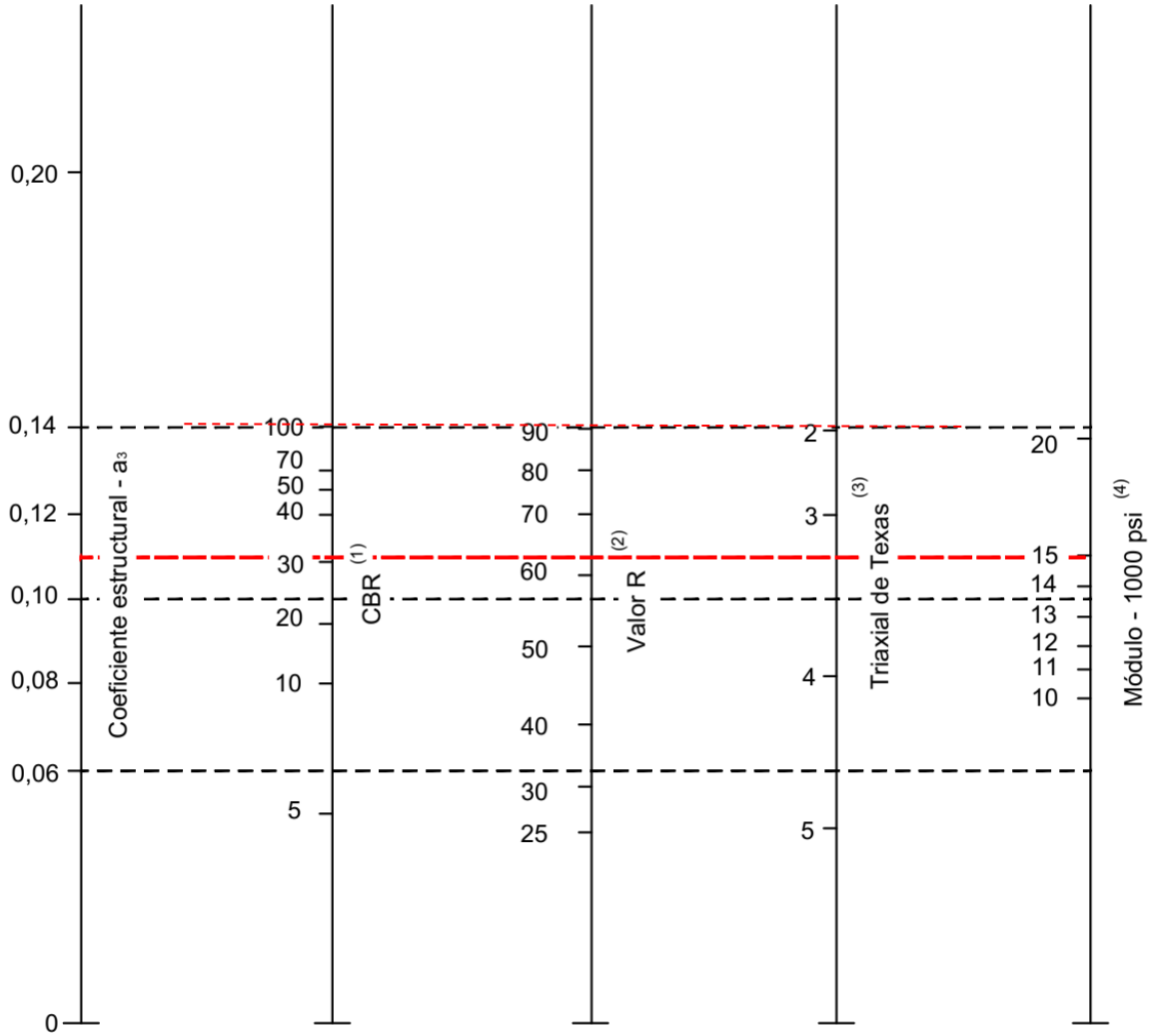


Figura C1-02

Nomograma de módulo resiliente para una subbase granular

Nota: Para este ejemplo de cálculo en específico, los valores de CBR para los materiales granulares, se suponen como los mínimos recomendados por el CR-2020. Para los diseños reales las propiedades de los materiales a utilizar en cada capa deben obtenerse con las pruebas de laboratorio pertinentes, ya sea el CBR o el módulo resiliente del material.

- iv. Carpeta asfáltica. Con un módulo de 450 000 psi y utilizando la Figura C1-03 Curva de coeficiente estructural contra módulo de la mezcla asfáltica se obtiene un coeficiente estructural a_1 de 0,44.

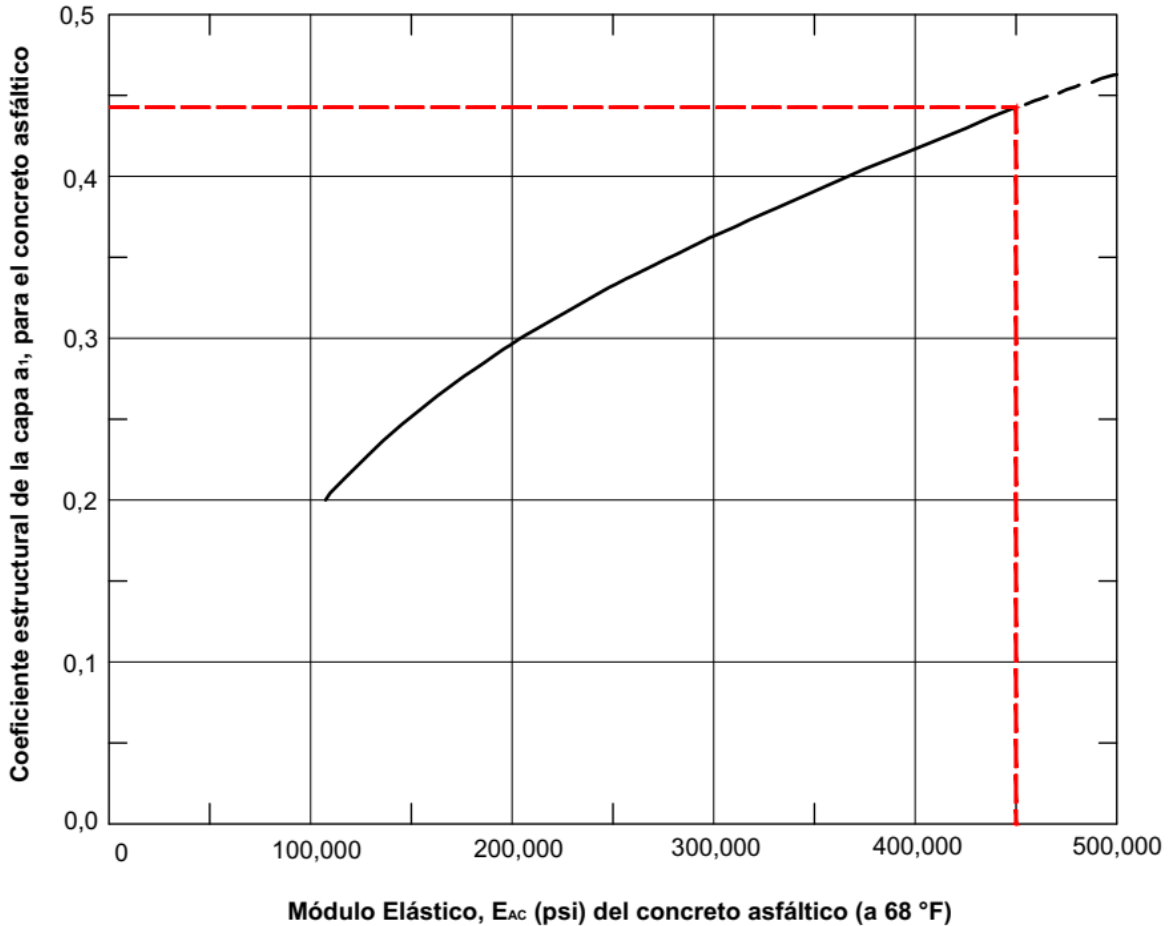


Figura C1-03

Curva de coeficiente estructural contra módulo de la mezcla asfáltica

ii. Estimación de espesores

- (1) Serviciabilidad inicial $P_o = 4,2$, valor común para pavimento flexible (Sección 203 Índice de serviciabilidad).
- (2) Serviciabilidad final $P_t = 2$, por ser tránsito bajo (*Tabla 204-03 Niveles de confianza e índice de serviciabilidad utilizados en Costa Rica*).

$$\Delta PSI = P_o - P_t = 4,2 - 2 = 2,2$$

Ec. 203-01

- (3) Coeficiente de corrección por drenaje. Considerando un drenaje regular y más del 25 % del tiempo expuesto a condiciones de humedad, el valor de m es igual a 0,80 (*Tabla 206-02 Valores recomendados de m para modificar el coeficiente estructural de la capa de base y subbase en pavimentos flexibles*).

- (4) Nivel de confianza. Considerando la carretera como una troncal rural, se utiliza las recomendaciones de AASHTO-93, nivel de confianza de 75 %, $Z_R = -0,674$ y $S_o = 0,45$ (*Tablas 204-01 Niveles de confiabilidad sugeridos para variar clasificaciones funcionales y 204-02 Valores de desviación normal estándar (Z_R) correspondientes a los niveles de confianza seleccionados*).
- (5) SN_1 requerido sobre la base. Con un CBR de 80, el módulo resiliente asociado según los nomogramas de AASHTO (Figura C1-01 Nomograma de módulo resiliente para una base granular) es de 28 000 psi.

Dicho valor de módulo se utiliza como insumo, al igual que los parámetros de diseño presentados anteriormente, para determinar el número estructural que debe poseer la capa que se encuentra encima de la base. Para esto utilizamos la *Ecuación 207-04* presentada en la *Sección 207 Coeficientes Estructurales* de la presente guía, misma que se muestra a continuación:

$$\text{Log}_{10}W_{18} = Z_r * S_o + 9,36 * \text{Log}_{10}(SN_1 + 1) - 0,20 + \frac{\text{Log}_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5}\right)}{\frac{0,40 + 1094}{(SN_1 + 1)^{5,19}}} + 2,32 * \text{Log}_{10}M_r - 8,07$$

$$\text{Log}_{10}(559\ 844) =$$

$$-0,674 * 0,45 + 9,36 * \text{Log}_{10}(SN_1 + 1) - 0,20 + \frac{\text{Log}_{10}\left(\frac{2,2}{4,2 - 1,5}\right)}{\frac{0,40 + 1094}{(SN_1 + 1)^{5,19}}} + 2,32 * \text{Log}_{10}(28000) - 8,07$$

Despejando el valor de SN_1 se obtiene:

$$SN_1 = 1,686$$

- (6) SN_2 requerido sobre la subbase. Es necesario conocer el módulo resiliente de la capa, este puede obtenerse con los nomogramas de AASHTO-93 o por medio de las ecuaciones de correlación. A continuación, se muestra el cálculo con las dos formas; se observa que, con los nomogramas, el valor estimado del módulo resiliente es muy similar a la ecuación de correlación recomendada para materiales granulares.

Utilizando la fórmula recomendada para materiales granulares (también se puede utilizar la *Figura C1-02 Nomograma de módulo resiliente para una subbase granular*) se obtiene que:

$$M_R (psi) = 4326 * \ln(CBR) + 241 = 4326 * \ln(30) + 241 = 14954 psi$$

Con el módulo resiliente de la subbase, es posible calcular el SN₂ requerido sobre la subbase:

$$\text{Log}_{10}W_{18} = Z_r * S_o + 9,36 * \text{Log}_{10}(SN_1 + 1) - 0,20 + \frac{\text{Log}_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5}\right)}{\frac{0,40 + 1094}{(SN_1 + 1)^{5,19}}} + 2,32 * \text{Log}_{10}M_r - 8,07$$

$$\text{Log}_{10}(559\ 844) =$$

$$-0,674 * 0,45 + 9,36 * \text{Log}_{10}(SN_2 + 1) - 0,20 + \frac{\text{Log}_{10}\left(\frac{2,2}{4,2 - 1,5}\right)}{\frac{0,40 + 1094}{(SN_2 + 1)^{5,19}}} + 2,32 * \text{Log}_{10}(14954) - 8,07$$

Despejando SN₂ se obtiene el siguiente valor:

$$SN_2 = 2,15$$

- (7) SN₃ requerido sobre la subrasante. Para determinar el valor del número estructural de las capas que se colocan sobre la subrasante, se utilizan las mismas ecuaciones que las utilizadas para determinar el valor de SN₁ y SN₂, sin embargo, en este caso se utiliza el módulo de la subrasante:

$$\text{Log}_{10}W_{18} = Z_r * S_o + 9,36 * \text{Log}_{10}(SN_1 + 1) - 0,20 + \frac{\text{Log}_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5}\right)}{\frac{0,40 + 1094}{(SN_1 + 1)^{5,19}}} + 2,32 * \text{Log}_{10}M_r - 8,07$$

$$\text{Log}_{10}(559\ 844) =$$

$$-0,674 * 0,45 + 9,36 * \text{Log}_{10}(SN_2 + 1) - 0,20 + \frac{\text{Log}_{10}\left(\frac{2,2}{4,2 - 1,5}\right)}{\frac{0,40 + 1094}{(SN_2 + 1)^{5,19}}} + 2,32 * \text{Log}_{10}(12000) - 8,07$$

Despejando SN₃ se obtiene:

$$SN_3 = 2,766$$

- (8) Cálculo de Espesores. Para determinar los espesores se sigue el procedimiento descrito en la guía AASHTO-93:

$$D_1^* \geq \frac{SN_1}{a_1} = \frac{1,686}{0,44} = 3,83 \text{ pulg} = 9,74 \text{ cm} \approx 10 \text{ cm}$$

$$SN_1^* = \frac{10}{2,54} * 0,44 = 1,732 \geq SN_1 \text{ Cumple}$$

Seguidamente se calcula el espesor requerido de la base:

$$D_2^* \geq \frac{2,15 - 1,732}{0,135 * 0,8} = 3,86 \text{ pulg} = 9,81 \text{ cm} \approx 10 \text{ cm}$$

El espesor mínimo de base granular recomendado es de 15 cm; como el valor del diseño no cumple, se asume 15 cm de espesor.

$$SN_2^* = D_2^*(\text{pulg}) * m * a_2 = \frac{15 \text{ cm}}{2,54} * 0,135 * 0,8 = 0,6378$$

$$SN_1^* + SN_2^* \geq SN_2$$

$$1,732 + 0,64 = 2,372 \geq 2,15 \text{ Cumple}$$

(9) Espesor de la capa de subbase.

$$D_3^* \geq \frac{SN_3 - (SN_1^* + SN_2^*)}{a_3 m_3}$$

$$D_3^* \geq \frac{2,766 - (1,732 + 0,64)}{0,11 * 0,8} = 4,49 \text{ pulg} = 11,42 \text{ cm} \approx 15 \text{ cm}$$

En este caso en particular el espesor requerido D_3 para la subbase es 15 cm, el cual coincide con el espesor mínimo permitido para la subbase.

Por lo tanto, la estructura del pavimento de acuerdo con los espesores obtenidos sería como se muestra en la Figura C1-04

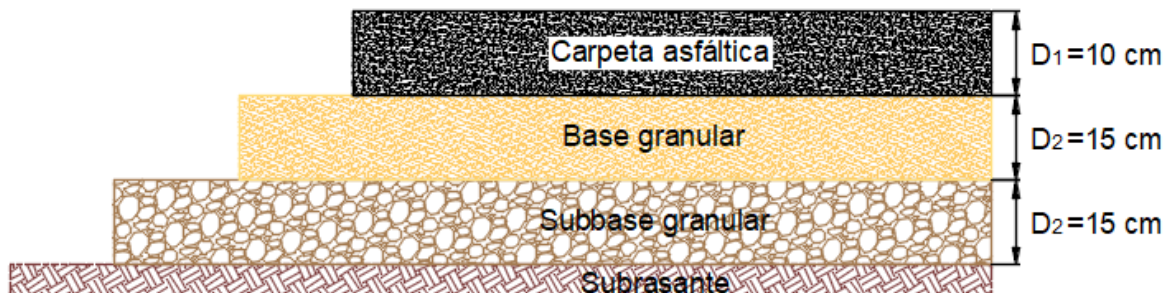


Figura C1-04

Ejemplo de diseño categoría 3: Esquema de espesores obtenidos con AASHTO-93

(i) Estimación de las propiedades mecánicas

i. Mezcla asfáltica

Corrección por temperatura- Método del Instituto del Asfalto:

Para la mezcla asfáltica se utilizaron, a modo de ejemplo, los siguientes resultados del ensayo de módulo resiliente a la tensión diametral indirecta.

Tabla C1-03

Datos generales de los especímenes de prueba.

Muestra: 2402-13 MRTD

No. Espécimen	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Carga (N)
7	150,19	74,63	16582
8	150,07	74,82	15093
9	150,13	74,75	16013
10	150,28	74,67	15326

Tabla C1-04

Resultados de módulo resiliente de mezclas asfálticas mediante tensión indirecta a una temperatura de 5 °C.

Muestra: 2402-13 MRTD

No. Espécimen	Temperatura (°C)	Carga Aplicada (N)	Módulo resiliente (MPa)
7	5,0	4514,8 ± 32,5	17517 ± 166
8	5,0	4495,3 ± 67,5	17415 ± 284
9	4,9	4459,0 ± 19,7	17635 ± 164
Promedio	5,0	4489,7 ± 39,9	17522 ± 205

Tabla C1-05

Resultados de módulo resiliente de mezclas asfálticas mediante tensión indirecta a una temperatura de 25 °C.

Muestra: 2402-13 MRTD

No. Espécimen	Temperatura (°C)	Carga Aplicada (N)			Módulo resiliente (MPa)		
7	25,2	2232,7	±	31,2	5757	±	108
8	25,2	2213,3	±	23,2	5813	±	104
9	25,0	2282,4	±	52,2	5287	±	114
Promedio	25,1	2242,8	±	35,5	5619	±	109

Tabla C1-06

Resultados de módulo resiliente de mezclas asfálticas mediante tensión indirecta a una temperatura de 40 °C.

Muestra: 2402-13 MRTD

No. Espécimen	Temperatura (°C)	Carga Aplicada (N)			Módulo resiliente (MPa)		
7	40,2	797,4	±	9,2	2137	±	49
8	40,1	753,8	±	25,1	2113	±	81
9	40,2	802,8	±	9,3	2113	±	41
Promedio	40,2	784,7	±	14,5	2121	±	57

Tabla C1-07

Resumen de resultados de módulo resiliente de mezclas asfálticas mediante tensión indirecta.

Muestra: 2402-13 MRTD

Temperatura (°C)	Módulo resiliente (MPa)
5,0 ± 0,0	17522 ± 205
25,1 ± 0,0	5619 ± 109
40,2 ± 0,0	2121 ± 57

Para la mezcla asfáltica se utilizaron, a modo de ejemplo, los siguientes resultados del ensayo Debido a que el módulo de la mezcla depende de la temperatura, es importante contar con datos climáticos de la zona en estudio. En este caso, se utilizarán datos de temperatura media del aire del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) para la zona de Ochomogo en la provincia de Cartago. Estos se presentan a continuación:

Tabla C1-08

Datos de temperatura mensual en la zona de Ochomogo

Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Pro m
Temperatura Media	16,5	16,8	17,5	18,4	18,9	18,8	18,4	18,6	18,7	18,3	17,3	17,0	17,9

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (IMN)

Con la temperatura promedio del aire se debe calcular la temperatura del pavimento. Para esto se utilizarán los modelos presentados en la Subsección 304.02 Ajuste por Temperatura del Módulo de la Mezcla Asfáltica del presente documento (ecuaciones del SHRP, LTPP, Instituto del Asfalto y Witczak). Los resultados se muestran resumidos en la siguiente tabla:

Tabla C1-09

Resumen de datos de temperatura en el pavimento

Modelos	Temperatura del pavimento	
	(°C)	(°F)
SHRP Máxima temperatura pavimento	27,4	81,3
LTPP Máxima temperatura pavimento	39,7	103,4
Instituto del asfalto		
Witczak 1992	41,3	106,3
Promedio	36,1	97,0

Utilizando el valor promedio de temperatura (36.1 °C) del pavimento, se determina el módulo de la mezcla tal como se muestra en la Figura C1-05 Variación del módulo resiliente con la temperatura, ensayo de tensión diametral.

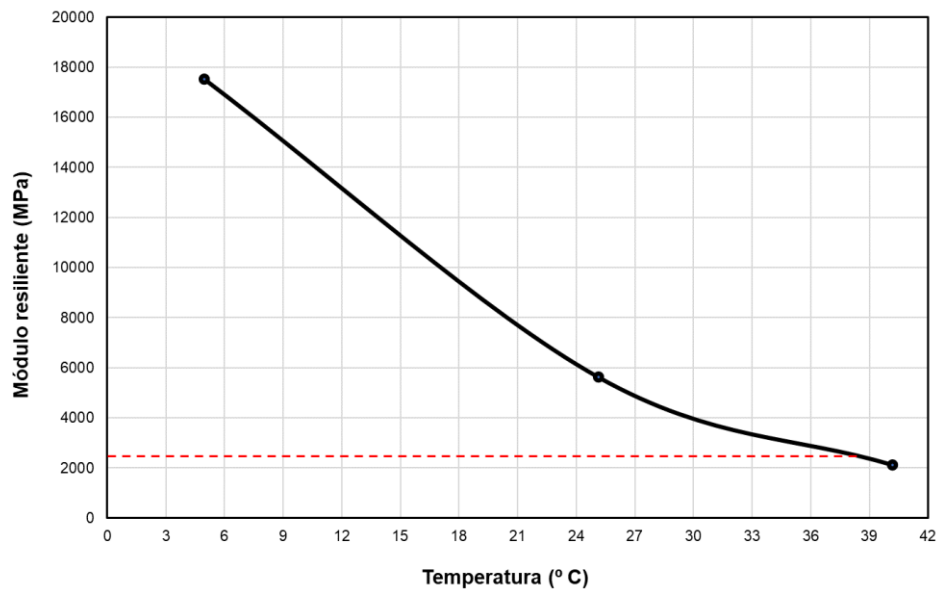


Figura C1-05

Variación del módulo resiliente con la temperatura, ensayo de tensión diametral.

El módulo de la mezcla asfáltica, según la figura anterior es de 2700 MPa, que equivale a 391 603 psi.

- (j) Análisis estructural. Para el análisis estructural del pavimento se utiliza un programa multicapa elástica (para este ejemplo se emplea Pitra-Pave). En este nivel de análisis los módulos de los materiales granulares son los mismos que los utilizados para la metodología AASHTO-93. En el caso de la capa asfáltica se utiliza el módulo de la mezcla asfáltica corregido por temperatura (391 603 psi). Para seleccionar los puntos de medición de las respuestas mecánicas en el software de análisis, se toman en cuenta los puntos recomendados por la guía AASHTO-93 para un eje simple dual (en este caso se modela un eje simple dual porque se desea simular un eje equivalente de carga ESAL, en este ejemplo no se considera desviación lateral), tal como se muestra en la siguiente figura:

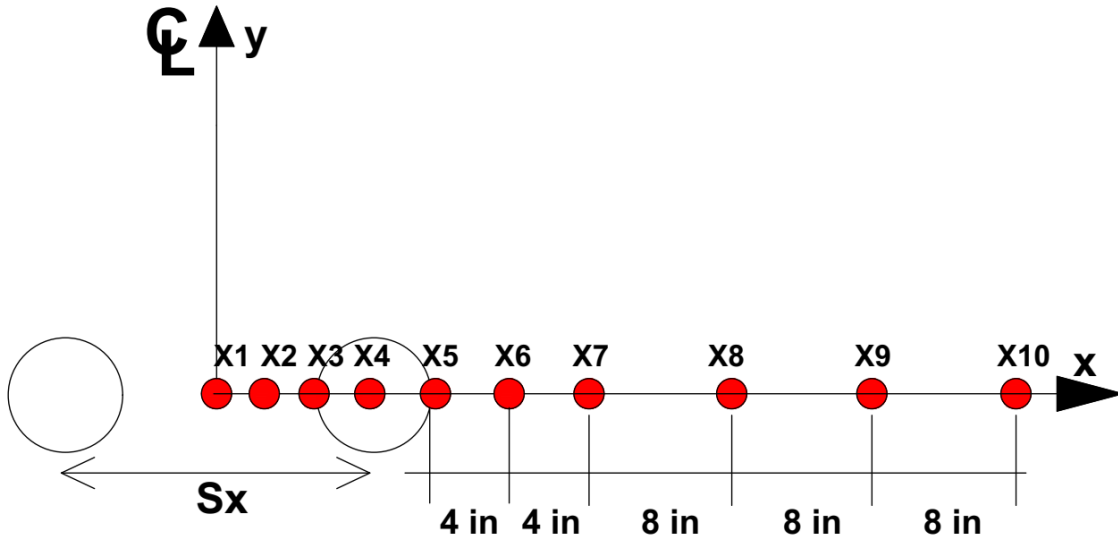


Figura C1-06

Vista superior de los puntos de análisis utilizados en software de análisis de multicapa elástica

En la figura anterior se muestra una vista superior del pavimento (el eje y representa la dirección del tránsito), donde los círculos blancos ilustran el área de carga o huella de los neumáticos del eje dual, mientras que los círculos pequeños de color rojo muestran los puntos de medición. Para este ejemplo específico solo se analizarán los puntos x1 a x5, ya que usualmente las respuestas críticas se encuentran en dichos puntos. Además, cada uno de los puntos se coloca a múltiples profundidades:

- En la superficie; $z = 0$ cm (0 in).
- En la fibra inferior de la capa asfáltica; $z = 9,99$ cm (3,936 in).
- En punto medio de cada capa; $z = 5$ cm (1,969 in), $z = 17,5$ cm (6,89 in). y $z = 32,5$ cm (12,796 in).
- En la fibra superior de la capa de subrasante; $z = 40,005$ cm (15,75 in)
- 6 pulgadas bajo la superficie de la subrasante; $z=55,24$ cm (21,749 in).

Nota: Las cargas utilizadas son de 4 500 lb por cada llanta del simple eje dual y una presión de contacto de 100 psi, por lo tanto, el radio de cada carga es de 3,78 in. La separación entre llantas duales es de 14,57 in. (37 cm).

(k) Resultados. A continuación, se muestran los resultados del análisis con el software de multicapa elástica (sin desviación lateral). En color anaranjado se resaltan las

deformaciones críticas para el desempeño del pavimento, además en la columna “Punto – Tabla C1-10.” Deformaciones obtenidas del análisis estructural se muestra la correspondencia entre los puntos de medición y los puntos de la Figura C1-06. según la nomenclatura AASHTO-93:

Tabla C1-10

Deformaciones obtenidas del análisis estructural.

Punto	Coordenada X	Coordenada Y	Coordenada Z	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Punto según Figura C1-06.
1	3,785	11,070	0,001	294,290	1,402	-158,870	X7
2		12,820	0,001	303,190	16,114	-171,170	
3		14,570	0,001	336,660	74,253	-178,190	
4		18,355	0,001	344,270	247,680	-159,680	
5		22,140	0,001	291,440	130,060	-109,490	
6		26,140	0,001	169,760	-31,398	-74,583	
7		30,140	0,001	104,980	-57,186	-25,701	
8		38,140	0,001	47,105	-46,596	-0,282	
9		46,140	0,001	24,695	-32,038	3,957	
10		54,140	0,001	14,229	-22,348	4,370	
11	3,785	11,070	1,969	11,419	41,245	-19,199	X4
12		12,820	1,969	7,285	47,121	-17,510	
13		14,570	1,969	-6,919	29,243	34,992	
14		18,355	1,969	-13,141	-17,129	123,100	
15		22,140	1,969	-10,837	10,973	56,539	
16	3,785	11,070	3,936	-260,090	59,918	128,320	X4
17		12,820	3,936	-270,910	33,700	150,070	
18		14,570	3,936	-299,580	-59,155	221,160	
19		18,355	3,936	-332,720	-246,430	349,600	
20		22,140	3,936	-259,550	-94,663	216,470	

Punto	Coordenada X	Coordenada Y	Coordenada Z	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Punto según Figura C1-06.
21	3,785	11,070	6,890	-285,180	-83,333	426,660	X4
22		12,820	6,890	-287,360	-96,306	443,150	
23		14,570	6,890	-292,510	-131,990	487,470	
24		18,355	6,890	-290,240	-192,900	550,440	
25		22,140	6,890	-244,170	-117,360	416,290	
26	3,785	11,070	12,796	-310,610	-205,100	547,110	X1
27		12,820	12,796	-309,710	-205,910	547,080	
28		14,570	12,796	-306,640	-207,240	545,510	
29		18,355	12,796	-290,410	-195,680	517,740	
30		22,140	12,796	-259,240	-145,510	435,100	
31	3,785	11,070	15,750	-330,390	-237,900	648,270	X1
32		12,820	15,750	-329,240	-237,180	646,140	
33		14,570	15,750	-325,530	-234,270	638,710	
34		18,355	15,750	-308,050	-212,630	595,770	
35		22,140	15,750	-277,810	-161,350	507,660	
36	3,785	11,070	21,749	-226,270	-186,680	468,220	X1
37		12,820	21,749	-225,570	-185,400	466,090	
38		14,570	21,749	-223,360	-181,280	459,260	
39		18,355	21,749	-213,560	-162,330	428,360	
40		22,140	21,749	-197,690	-130,460	377,130	

(l) Verificación del agrietamiento por fatiga

Según el modelo AASHTOWare calibrado para Costa Rica:

$$M = 4,84 \left[\frac{11,33}{4 + 11,33} - 0,69 \right] = 0,237$$

$$C = 10^{0,297} = 1,728$$

Para agrietamiento de abajo-arriba:

$$k'_1 = \frac{1}{0,000398 + \frac{0,003602}{1 + e^{(11,02 - 3,49 * 3,937)}}} = 264,73$$

$$N_f = 0,007566 * C * k'_1 * bf_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{(3,9492 * bf_2)} \left(\frac{1}{E^*} \right)^{(1,281 * bf_3)}$$

Donde los parámetros b_1 , b_2 y b_3 son factores de calibración locales para Costa Rica, que en este caso tienen valores de: $bf_1 = 0,9739$, $bf_2 = 0,9948$ y $bf_3 = 1,0907$. Sustituyendo en la ecuación anterior:

$$N_f = 0,007566 * 1,728 * 264,73 * 0,9739 * \left(\frac{1}{332,72 * 10^{-6}} \right)^{(3,9492 * 0,9948)} \left(\frac{1}{391\,603 \text{ psi}} \right)^{(1,281 * 1,0907)}$$

$$= 2\,382\,330$$

En este caso, las cargas admisibles para que la estructura falle por fatiga son mayores que los ESAL's de diseño, este valor servirá de insumo para calcular el porcentaje de área agrietada a lo largo de la vida de diseño de la estructura de pavimento. Es importante tener en cuenta que la estructura debe cumplir con los criterios de deformación permanente y área agrietada (mostrados en la Subsección 102.04 Criterios de desempeño y Niveles de Confiabilidad).

Daño acumulado y porcentaje de agrietamiento

El cálculo del daño se realiza con base en la teoría de Miner, por lo tanto, se utiliza la Ecuación 402-06 mostrada en la Sección 402 Daño Acumulado y Desviación Lateral de esta guía. Dicho porcentaje de daño acumulado posee un error estándar asociado (S_e) que se utiliza para corregir el porcentaje de agrietamiento calculado. El error se calcula con la expresión de la Ecuación 504-05. Para determinar el área agrietada considerando la confiabilidad, se utiliza la expresión que se presenta en la Ecuación 504-06.

$$S_e = 0,5 + \frac{12}{1 + e^{1,308 - 2,949 * \log \log D}}$$

$$FC_{B-U} - P = FC_{B-U} + S_e FC_{B-U} x Z_p$$

Para el nivel de análisis, utilizando los umbrales establecidos, para menos de 3 millones de ejes equivalentes de diseño, se utilizó un 75 % de confiabilidad. A continuación, se muestra un resumen del daño acumulado por año y el porcentaje de área agrietada FC:

Tabla C1-11

Resultados de daño acumulado y porcentaje de agrietamiento

Año	ESAL's año	ESAL's acumulado	Daño acumulado (%)	Error % (S _e)	FC (%)	FC confiabilidad (75 %)
1	27959	27959	1,2	0,000	3,490	2,354
2	29078	57037	2,4	0,000	5,932	4,001
3	30241	87278	3,7	0,000	7,554	5,095
4	31450	118728	5,0	0,000	8,648	5,833
5	32708	151436	6,4	0,000	9,414	6,350
6	34017	185453	7,8	0,000	9,971	6,725
7	35377	220830	9,3	0,000	10,388	7,007
8	36792	257623	10,8	0,001	10,710	7,225
9	38264	295887	12,4	0,002	10,964	7,397
10	39795	335682	14,1	0,003	11,168	7,536
11	41386	377068	15,8	0,006	11,334	7,651
12	43042	420110	17,6	0,010	11,472	7,747
13	44764	464874	19,5	0,016	11,587	7,831
14	46554	511428	21,5	0,025	11,685	7,906
15	48416	559844	23,5	0,037	11,769	7,975

Se puede observar que el daño alcanza un 23,5 % en el periodo de diseño de 15 años. Para visualizar más fácilmente la evolución del daño, se presenta la siguiente figura:

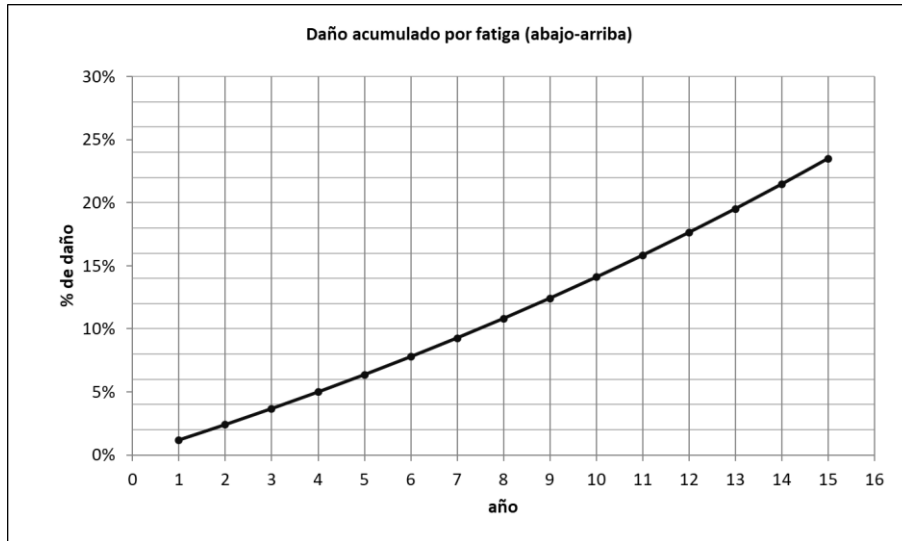
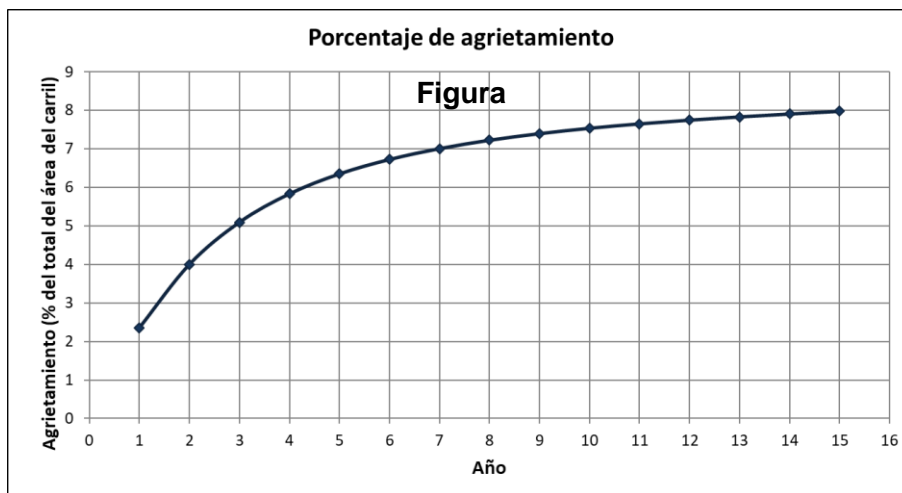


Figura C1-07

Porcentaje de daño acumulado para la estructura original

Con el valor de daño se puede calcular el porcentaje de agrietamiento por fatiga. En la siguiente figura se muestra la evolución del porcentaje de área agrietada:



C1-08

Porcentaje de agrietamiento para la estructura original

Como se puede observar, para las condiciones dadas, la estructura no alcanza el agrietamiento máximo permitido de 35 % (ver Tabla 102-30 Criterios de desempeño para porcentaje de área agrietada a la confiabilidad asociada) para una carretera por la cual

circulan menos de 3 millones de ESAL's, por lo tanto, la estructura cumple por fatiga asociado al porcentaje de grietas (abajo-arriba)

En el caso de la verificación por fatiga, para la variable longitud de grietas, se obtuvo un valor de 356.4 ft/mi (67.5 m/km), el cual se encuentra por debajo del umbral definido en la Tabla 102-04 (Criterios de desempeño para grietas longitudinales en el carril de diseño a la confiabilidad asociada), el cual corresponde a 2000 ft/mi (380 m/km)

Verificación de la deformación de la mezcla asfáltica

Para calcular la deformación permanente se utilizan las ecuaciones propuestas en Subsección 501.01 Mezcla Asfáltica de la presente guía.

Procedimiento

Deformación unitaria vertical: $\varepsilon_v = 123,1 \mu s$

$T =$ Temperatura de la mezcla de $36,1 \text{ }^\circ\text{C} = 97,0 \text{ }^\circ\text{F}$.

$$C_1 = -0,1039 * 3,937^2 + 2,4868 * 3,937 - 17,342 = -9,162$$

$$C_2 = 0,0172 * 3,937^2 - 1,7331 * 3,937 + 27,428 = 20,87$$

$$k_1 = (C_1 + C_2 * d) * 0,328196^d = \left(-9,162 + 20,871 * \frac{3,937}{2} \right) * 0,328196^{3,937/2} = 3,5614$$

$$\frac{\varepsilon_p}{123,1 * 10^{-6} \text{ in/in}} = 10^{-3,35412} 97,0^{1,5606} (559844)^{0,479244}$$

$$\varepsilon_p \left(\frac{\text{in}}{\text{in}} \right) = 0,039$$

$$\text{Deformación total} = \varepsilon_p * k_1 = 0,039 * 3,5614 = 0,139 \text{ in} = 0,352 \text{ cm}$$

- Confiabilidad para la mezcla asfáltica

$$Se_{MAC} = 0,24 * 0,139^{0,8026} + 0,001 = 0,034 \text{ in} (0,086 \text{ cm})$$

Verificación de la deformación de las capas granulares

Para calcular la deformación permanente se utilizan las ecuaciones propuestas en la Subsección 501.02 Materiales granulares, de la presente guía.

Procedimiento para la Base

Tomando en cuenta que:

Profundidad del nivel freático (GTW): 7,75 m = 25,43 ft (considerado para todos los casos).

$$W_c = 51,712 \left[\left(\frac{28000}{2555} \right)^{\frac{1}{0,64}} \right]^{-0,3586 * 25,43^{0,1192}} = 7,19$$

$$\log \beta = -0,61119 - 0,017638 * 7,19 = -0,738$$

$$\beta = 10^{-0,738} = 0,1828$$

$$\rho = 10^9 \left[\frac{\ln \left[\frac{(0,15)}{20} \right]}{1 - (10^9)^{0,1828}} \right]^{\frac{1}{0,1828}} = 6708,9$$

$$\left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) = \frac{(e^{(6708,9)^{0,1828}} * 0,15) + (e^{(6708,9/10^9)^{0,1828}} * 20)}{2} = 22,40$$

$$\delta_a = \beta_{BG} * \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) e^{-\left[\frac{p}{N} \right]^\beta} \varepsilon_v h =$$

$$2,03 * (22,40) e^{-\left[\frac{6708,9}{559844} \right]^{0,1828}} * \left(550,44 * 10^{-6} \frac{in}{in} \right) * 5,906 = 0,095 in = 0,24 cm$$

- Confiabilidad para la base granular

$$Se_{Granular} = 0,1235 * 0,0950^{0,5012} + 0,001 = 0,026 in (0,067 cm)$$

Procedimiento para la Subbase

$$W_c = 51,712 \left[\left(\frac{14954}{2555} \right)^{\frac{1}{0,64}} \right]^{-0,3586 * 25,43^{0,1192}} = 12,06$$

$$\log \beta = -0,61119 - 0,017638 * 12,6 = -0,824$$

$$\beta = 10^{-0,824} = 0,150$$

$$\rho = 10^9 \left[\frac{\ln \left[\frac{(0,15)}{20} \right]}{1 - (10^9)^{0,150}} \right]^{\frac{1}{0,150}} = 53560,35$$

$$\left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) = \frac{(e^{(53560,35)^{0,150}} * 0,15) + (e^{(53560,35/10^9)^{0,150}} * 20)}{2} = 25,14$$

$$\delta_a = \beta_{BG} * \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) e^{-\left[\frac{p}{N} \right]^\beta} \varepsilon_v h =$$

$$2,03 * (25,14) e^{-\left[\frac{53560,35}{559844} \right]^{0,150}} * \left(547,11 * 10^{-6} \frac{in}{in} \right) * 5,906 = 0,082 in = 0,207 cm$$

- Confiabilidad para la subbase granular

$$Se_{Granular} = 0,1235 * 0,082^{0,5012} + 0,001 = 0,024 in (0,062 cm)$$

Procedimiento para la Subrasante

$$W_c = 51,712 \left[\left(\frac{7500}{2555} \right)^{\frac{1}{0,64}} \right]^{-0,3586 * 25,43^{0,1192}} = 21,29$$

$$\log \beta = -0,61119 - 0,017638 * 21,29 = 0,987; \beta = 10^{-0,987} = 0,103$$

$$\rho = 10^9 \left[\frac{\ln \left[\frac{(0,15)}{20} \right]}{1 - (10^9)^{0,103}} \right]^{\frac{1}{0,103}} = 16\,499\,884,2$$

$$\left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) = \frac{(e^{16\,499\,884,2^{0,103}} * 0,15) + (e^{(16\,499\,884,2/10^9)^{0,103}} * 20)}{2} = 38,50$$

- Para z=0 in. (superficie de la subrasante)

$$\varepsilon_p = \beta_{SG} * \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) e^{-\left[\frac{p}{N} \right]^\beta} \varepsilon_v = 1,35 * (38,5) e^{-\left[\frac{16\,499\,884,2}{559844} \right]^{0,103}} * \left(648,27 * 10^{-6} \frac{in}{in} \right) = 0,00817 in$$

- Para z=6 in.

$$\varepsilon_p = \beta_{SG} * \left(\frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_r}\right) e^{-\left[\frac{p}{N}\right]^\beta} \varepsilon_v = 1,35 * (38,5) e^{-\left[\frac{16\,499\,884,2}{559844}\right]^{0,243}} * \left(468,22 * 10^{-6} \frac{in}{in}\right) = 0,0059 in$$

- Total para la subrasante

$$k = \frac{1}{6} * \ln\left(\frac{\varepsilon_{p,z=0}}{\varepsilon_{p,z=6}}\right) = \frac{1}{6} * \ln\left(\frac{0,00817 in}{0,0059 in}\right) = 0,054$$

$$\delta = \int_0^{h_{roca}} \varepsilon_p(z) dz$$

$$\delta = \varepsilon_p(z) dz \int_0^{h_{roca}} e^{-kz} dz = \left(\frac{1 - e^{-k * h_{roca}}}{k}\right) \varepsilon_{p,z=0}$$

Donde,

δ = deformación plástica total de la subrasante, in.

h_{roca} = profundidad de la roca, pies.

$$\delta = \left(\frac{1 - e^{-0,054 * 350}}{0,054}\right) * 0,00817 in = 0,151 in = 0,382 cm$$

- Confiabilidad para la subrasante

$$Se_{Suelo} = 0,1477 * 0,151^{0,6711} + 0,001 = 0,029 (0,073 cm)$$

Deformación permanente total

$$RD_{MAC} = 0,352 + 0,086 cm = 0,438 cm$$

$$RD_{BG} = 0,240 cm + 0,067 cm = 0,307 cm$$

$$RD_{SB} = 0,207 cm + 0,062 cm = 0,269 cm$$

$$RD_{SR} = 0,382 cm + 0,073 = 0,455 cm$$

Dentro del cálculo de deformación permanente deben tomarse en cuenta los errores asociados. Cada capa posee un error estándar asociado (S_e) y será determinado como se indica en la Ecuación 504-01, para una confiabilidad del 75% ($Z_p=0,674$). Por lo tanto, la deformación permanente total es:

$$RD_{Total} = 1,47 cm$$

Utilizando los umbrales establecidos, para la categoría 3. (< 3 millones de ejes equivalentes de diseño), se utilizó una deformación permanente permisible de 16 mm con una confiabilidad del 75 %. En la siguiente imagen se puede visualizar de forma más sencilla la evolución de la deformación en cada capa, cabe resaltar que la mayor deformación se observa en la subrasante y en la carpeta asfáltica, sin embargo, se cumple con el umbral definido.

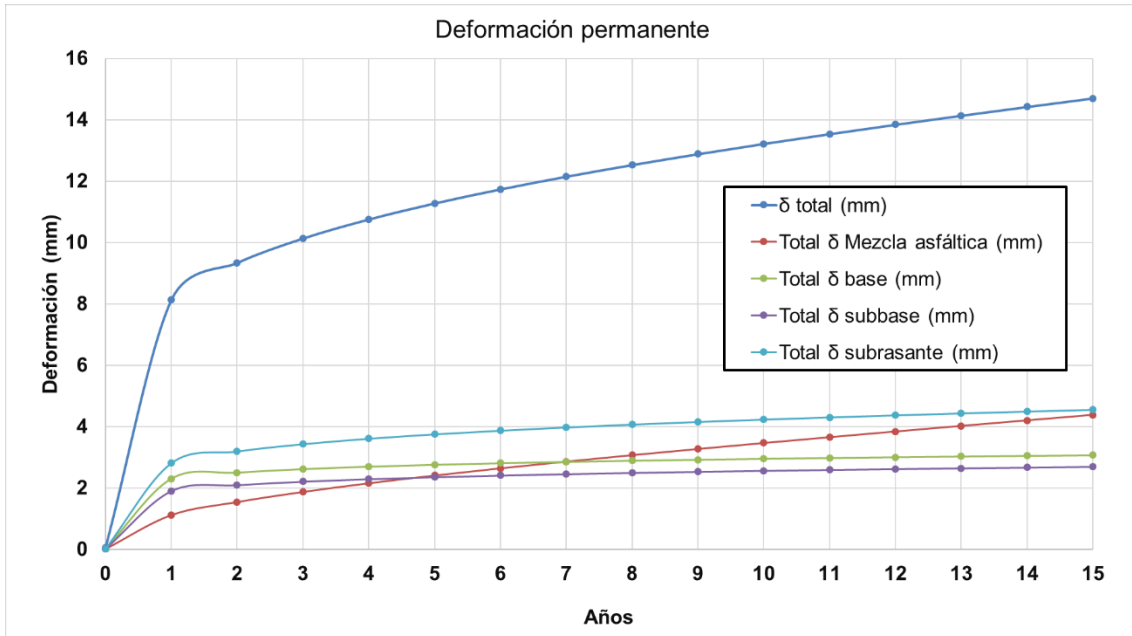


Figura C1-09

Deformación permanente en la estructura original

Observaciones

Si bien, el diseño propuesto cumple con todos los parámetros de desempeño se propone realizar corridas adicionales que permitan optimizar los espesores de las capas para obtener un diseño alternativo Zp.

Tabla C1-12

Resumen de parámetros de desempeño de la estructura original

Deterioro	Valor
Fatiga (MEPDG) (N _f admisibles)	2 382 330

Deformación total (cm)	1,47
Porcentaje de agrietamiento a los 15 años (%)	7.975

Después de varias corridas se modifican los espesores de los materiales granulares (base y subbase) y se reduce en 1 cm el espesor de la mezcla asfáltica.

Estructuras propuestas – Iteración 3

Características generales de la estructura

La alternativa de diseño analizada presenta las siguientes características generales:

Tabla C1-13

Características generales de las capas de la estructura propuesta - iteración1

Capa	Espesor (cm)	Módulo (psi)
CA	9	377099
Base	20	28000
Subbase	20	14954
Subrasante	-	7500

Nótese que las propiedades de los materiales no cambian, ya que se trabajará con los materiales disponibles inicialmente. El módulo de la mezcla asfáltica se ajustó como consecuencia de la reducción del espesor de la capa bituminosa.

Resultados obtenidos

El procedimiento de cálculo y análisis para todas las estructuras es el mismo que el que se expuso anteriormente para la estructura inicial. A continuación, se presenta un resumen de los resultados obtenidos con la estructura propuesta:

Tabla C1-14

Parámetros de desempeño de la estructura propuesta – iteración1

Deterioro	Valor
Fatiga (MEPDG) (N _r admisibles)	2 365 168

Deformación total (cm)	1,59
Porcentaje de agrietamiento a los 15 años (%)	7,97
Longitud de grietas a los 15 años (ft/mi)	327.8

Para esta iteración se observa que el parámetro de área agrietada cumple de manera aceptable y la deformación permanente está en el límite del umbral de diseño. Por tanto, se puede considerar que se alcanza un valor aceptable para este caso de estudio.

Para visualizar de mejor manera la evolución del daño, el porcentaje de área agrietada y la deformación permanente, se presentan los siguientes gráficos:

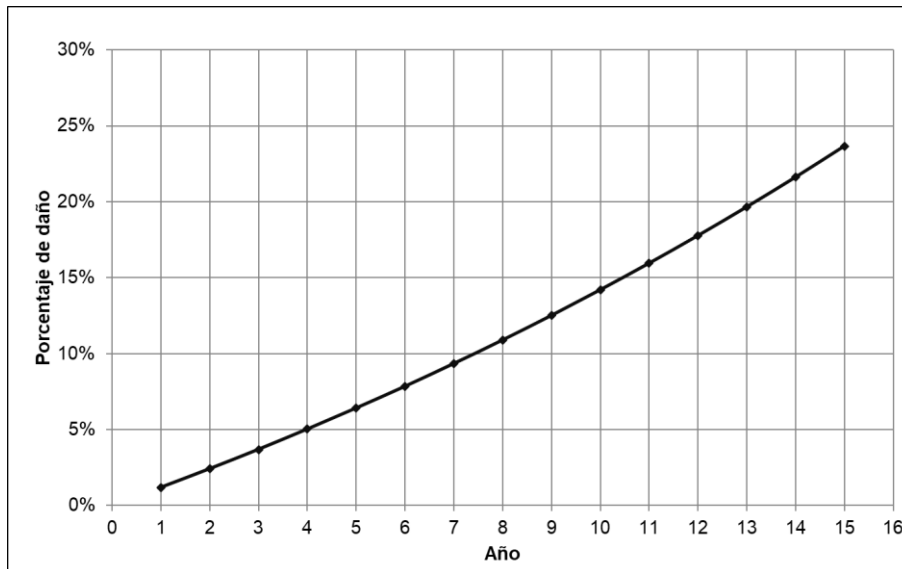


Figura C1-10
Porcentaje de daño acumulado para la iteración3

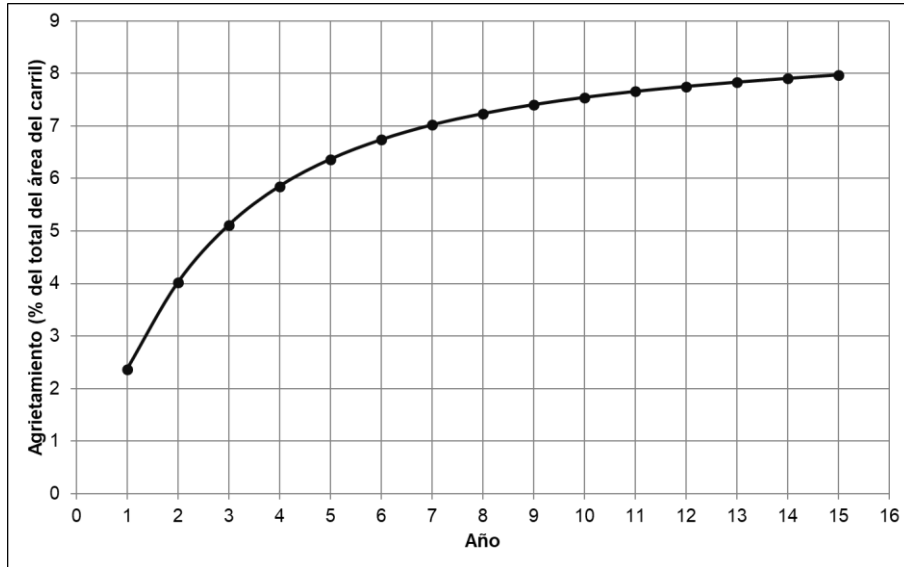


Figura C1-11
Porcentaje de agrietamiento para la iteración 3

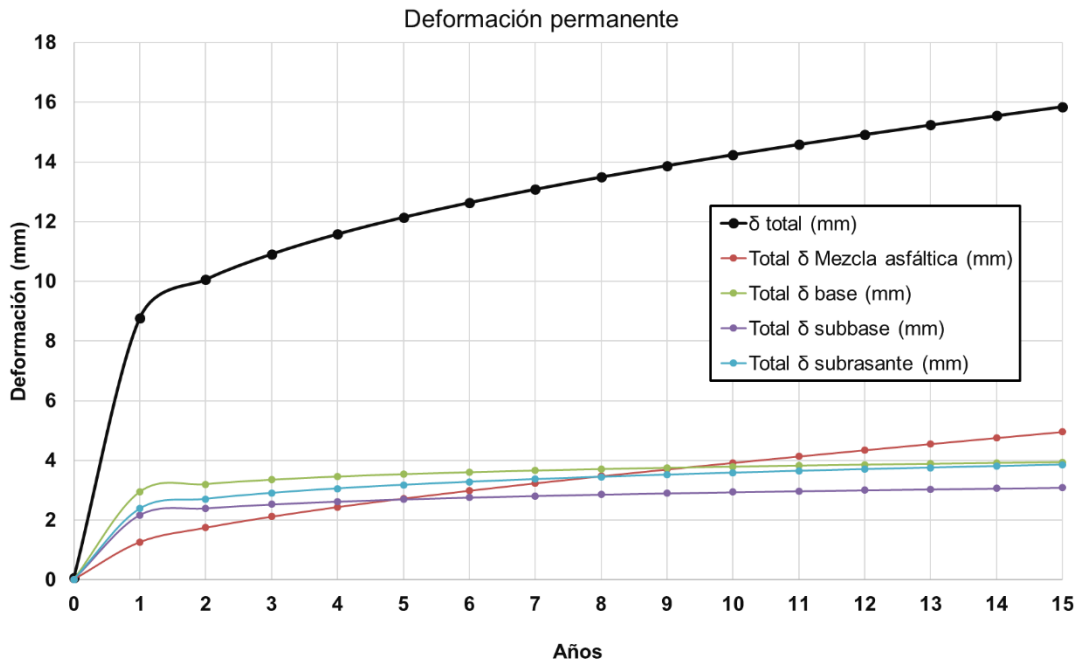


Figura C1-12
Deformación permanente en la iteración3

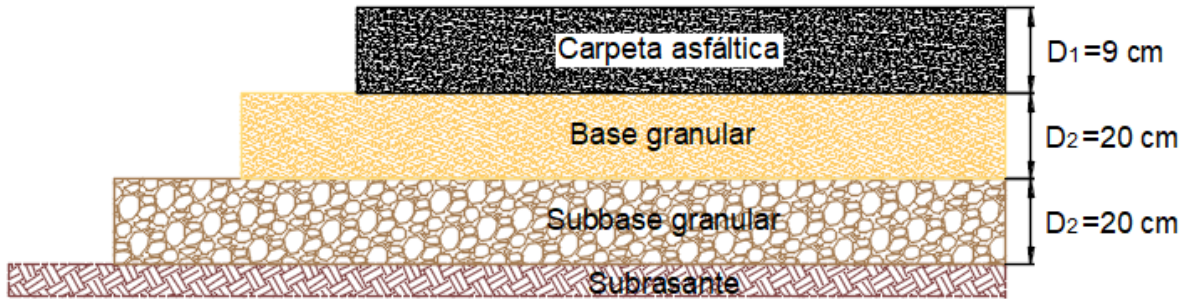


Figura C1-13

Estructura final propuesta para el diseño categoría 3

Anexo C.2 Ejemplo de diseño categoría 1

En los siguientes apartados se brinda un ejemplo de cálculo que pretende mostrar la forma de aplicar el procedimiento expuesto anteriormente para un diseño categoría 1, y las circunstancias particulares que pueden darse durante su aplicación. Es importante aclarar que, en este ejemplo, no todas las variables incorporadas son propias del proyecto. En algunos casos, los datos de entradas fueron estimados de forma indirecta por modelos constitutivos de referencia, como ejemplo. También se utilizó la información meteorológica disponible, más próxima a la zona del proyecto, para establecer las características climáticas.

En las Tablas C2-01, C2-02, C2-03 y C2-04 se muestra la información necesaria para desarrollar el diseño MEPDG para un nivel de análisis categoría 1. Las propiedades de los materiales, propuestos para este caso, se obtuvieron en el laboratorio. Los factores camión son tomados de esta guía de diseño Tabla C2-07 (columna 95 % confiabilidad). Finalmente, las tasas de crecimiento fueron recuperadas de estudio de tráfico del segmento de carretera de este ejemplo.

Tabla C2-01

Datos generales del Proyecto

Información general del proyecto	
Ubicación:	Cartago (Paraíso)
Tramo:	Ruta 224 – Paraíso, Cartago
Latitud de zona:	9,83 grados
Tipo de carretera:	Primaria
Carriles por sentido:	2
Ancho del carril:	3,60 m

Tabla C2-02

Información de tráfico del Proyecto

Información sobre el tráfico	
Tipo de vehículo:	Distribución
Pickup:	68,14 %
C2+:	18,23 %
C2:	6,32 %
Bus:	4,53 %
C3:	1,07 %
C4:	0,37 %
T3-S2:	1,34 %
Pickup:	68,14 %
Tasas de crecimiento:	Vehículos livianos: 4,5%. Vehículos pesados: 2,0%. Buses: 1,0%.
TPDA:	25 016 (Aforo realizado en el año 2019)
<i>El TPDA se proyecta al año base (2022)</i>	
Año base:	2022
TPDA Pickup:	19 452
TPDA pesados:	7 255
TPDA Buses:	1 168
TPDA total año base:	27 875

Tabla C2-03*Propiedades del suelo de subrasante y materiales granulares*

Propiedades de los materiales granulares	
Suelo de subrasante	
Clasificación:	MH (SUCS)
CBR:	5% (método de ensayo AASHTO T 193). Correspondiente al percentil 16 de los valores obtenidos en el laboratorio a partir del estudio geotécnico en la sección homogénea analizada.
Base granular:	
Clasificación:	A-1-a (0). AASHTO M 145
CBR:	100%
Subbase granular:	
Clasificación:	A-1-a (0). AASHTO M 145
CBR:	30%

Tabla C2-04*Características de la mezcla asfáltica*

Propiedades volumétricas	
Clasificación:	Mezcla asfáltica densa. Tamaño máximo nominal: 19 mm
Tipo de ligante:	AC 30
Vacíos con aire:	4%
Asfalto total P_b :	6% (por masa)
Asfalto efectivo V_{be} :	11,33% (por volumen)

Tabla C2-05

Módulo dinámico de la mezcla asfáltica (Temperatura de referencia 70 °F)

Temperatura (°F)	Frecuencia (Hz)	E* (ksi)	Ángulo de fase
14	25	2322,6	3,4
14	10	2252,4	4,6
14	5	2194	5,2
14	1	1992,3	6
14	0.5	1911	6,4
14	0.1	1707,2	7,8
40	25	1880,4	8,3
40	10	1753,8	9,1
40	5	1671,9	10,2
40	1	1385,3	11,9
40	0.5	1277,7	13
40	0.1	1034,9	16,2
70	25	1013	23
70	10	919,2	24,4
70	5	809	23,8
70	1	527,5	26,2
70	0.5	440,4	27,8
70	0.1	273,5	30,5
100	25	369,5	30,5
100	10	296,5	38,7
100	5	200,2	32,5
100	1	97,9	37,2
100	0.5	70,2	38,4
100	0.1	33,5	36,4
130	25	110,8	30,2
130	10	79,3	28,6
130	5	61	23,6
130	1	44,4	20,1
130	0.5	39,4	17,5
130	0.1	32,2	12,3

Tabla C2-06

Condiciones meteorológicas de la zona del proyecto

Mes	Precipitación (mm)	Temperatura media °F	Temperatura media °C
Enero	66,20	64,58	18,10
Febrero	52,50	65,12	18,40
Marzo	32,50	66,2	19,00
Abril	59,40	67,82	19,90
Mayo	192,20	69,08	20,60
Junio	205,10	69,08	20,60
Julio	170,80	68,18	20,10
Agosto	174,30	68,54	20,30
Setiembre	247,90	69,08	20,60
Octubre	250,30	68,72	20,40
Noviembre	163,30	66,92	19,40
Diciembre	91,60	65,48	18,60

Estimación inicial con AASTHO-93

1. Módulo de la mezcla considerado = 450 000 psi.
2. Factor direccional, $LDF = 0,6$.
3. Factor por carril, con dos carriles por sentido, $DL = 0,80$.
4. Factor de crecimiento, se estimó un 4,5 % para los vehículos livianos; 2,0 % para el tránsito pesado y 1,0 % para los buses.

$$GF \text{ livianos} = \frac{|(1+r)^n - 1|}{r} = \frac{|(1+4,5\%)^{20} - 1|}{4,5\%} = 31,37$$

$$GF \text{ pesados} = \frac{|(1+r)^n - 1|}{r} = \frac{|(1+2,0\%)^{20} - 1|}{2,0\%} = 24,30$$

$$GF \text{ buses} = \frac{|(1+r)^n - 1|}{r} = \frac{|(1+1,0\%)^{20} - 1|}{1,0\%} = 22,02$$

Al final del período de diseño (año 20) se tendrá un tránsito promedio diario anual de 52 652. Se realizó una verificación del TPDA de saturación es 59 884, por tanto, no se excederá la capacidad de la vía.

5. Factor camión, en este caso de estudio y por el tipo de ruta se utilizaron los factores camión para un nivel de confianza de 95 %.

Tabla C2-07

Factores camión para Costa Rica

Factores camión histórico 2007 - 2017 para diferentes niveles de confiabilidad					
Vehículo	80 %	85 %	90 %	95 %	99 %
Pickup	0,0131	0,0133	0,0137	0,0142	0,0151
C2	0,360	0,400	0,451	0,527	0,670
Bus C2	2,559	2,730	2,954	3,281	3,893
C2+	0,093	0,107	0,126	0,154	0,205
C3	1,250	1,414	1,621	1,928	2,504
C4	1,123	1,193	1,282	1,413	1,659
T3-S2	1,920	2,098	2,321	2,652	3,273
T3-S3	2,142	2,230	2,341	2,506	2,815

6. Ejes equivalentes de diseño

$$ESAL_{día} = \%vehículo * TPDA * FC$$

$$ESAL_{día livianos} = [(68,14\% * 0,014)] * 27\ 875$$

$$ESAL_{día livianos} = 265,916$$

ESAL_{día pesados}

$$= [(18,23\% * 0,154) + (6,32\% * 0,527) + (1,07\% * 1,928) + (0,37\% * 1,413) + (1,34\% * 2,652)] * 27\ 875$$

$$ESAL_{día pesados} = 3\ 422,356$$

$$ESAL_{día buses} = [(4,53\% * 3,281)] * 27\ 875$$

$$ESAL_{día buses} = 4\ 143,042$$

$$ESAL_{diseño} = ESAL_{día} * GF * 365 * LDF * DL$$

$$ESAL_{diseño} = [(265,916 * 31,37) + (3\ 422,356 * 24,30) + (4\ 143,042 * 22,02)] * 365 * 0,60 * 0,80 = 32\ 015\ 141$$

7. Categoría de análisis

$$ESAL_{diseño} = 32\,015\,141 > 25 \text{ millones, Categoría 1.}$$

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los cálculos obtenidos en la estimación de los ESAL's de diseño, utilizando los factores mencionados previamente:

Tabla C2-08

Resumen de ejes equivalentes de diseño para el proyecto

Tipo de vehículo	Vehículo %	Factor camión	TPDA	Factor de crecimiento	ESAL's
Pickup	68,14	0,014	18 994	31,37	1 461 483
C2+	18,23	0,154	5 082	24,30	3 331 675
C2	6,32	0,527	1 762	24,30	3 952 601
Bus	4,53	3,281	1 263	22,02	15 983 457
C3	1,07	1,928	298	24,30	2 448 195
C4	0,37	1,413	103	24,30	620 439
T3-S2	1,34	2,652	374	24,30	4 217 291
ESAL's DE DISEÑO:					32 015 141

8. Estimación de los coeficientes estructurales:

- i. Subrasante. Utilizando la ecuación recomendada para suelos de grano fino, el módulo resiliente en este caso de estudio se estima como:

$$M_R = 1500 * CBR = 1500 * 5 = 7\,500 \text{ psi}$$

El valor de CBR de la subrasante para este caso es de 5 %. Este dato fue obtenido en el laboratorio a través del análisis de muestras recuperadas in situ. Sin embargo, también podría utilizarse un modelo constitutivo específico para el material presente del sitio del proyecto.

- ii. Base granular. Con un CBR igual a 100 y la Figura C2-01 Nomograma de módulo resiliente para una base granular se obtiene un a_2 de 0,14.

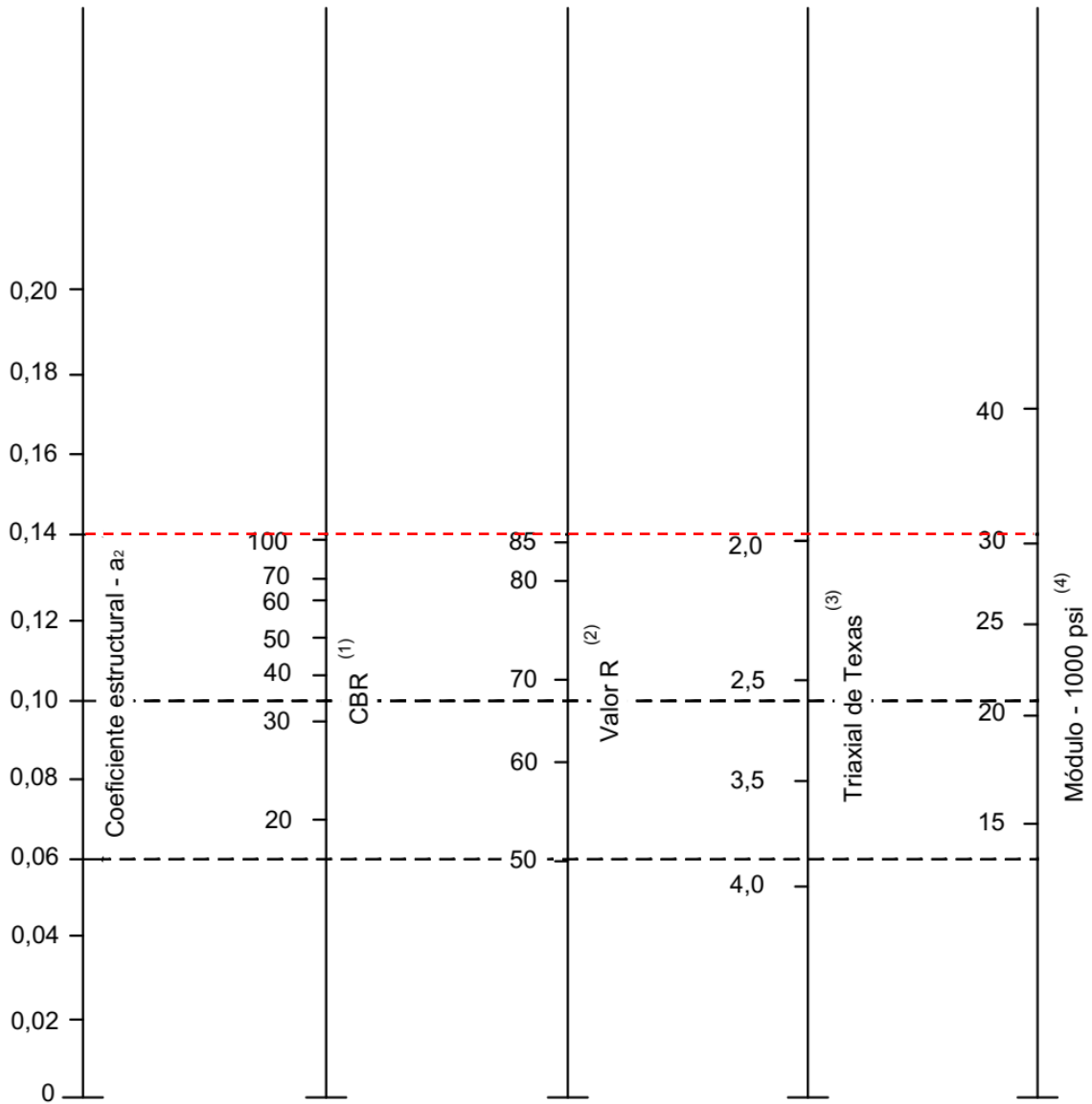


Figura C2-01

Nomograma de módulo resiliente para una base granular

- iii. Subbase granular. Con un CBR = 30 (dato obtenido del análisis de una muestra del material propuesto) y utilizando la Figura C2-02 Nomograma de módulo resiliente para una subbase granular se obtiene un coeficiente estructural a_3 de 0,11.

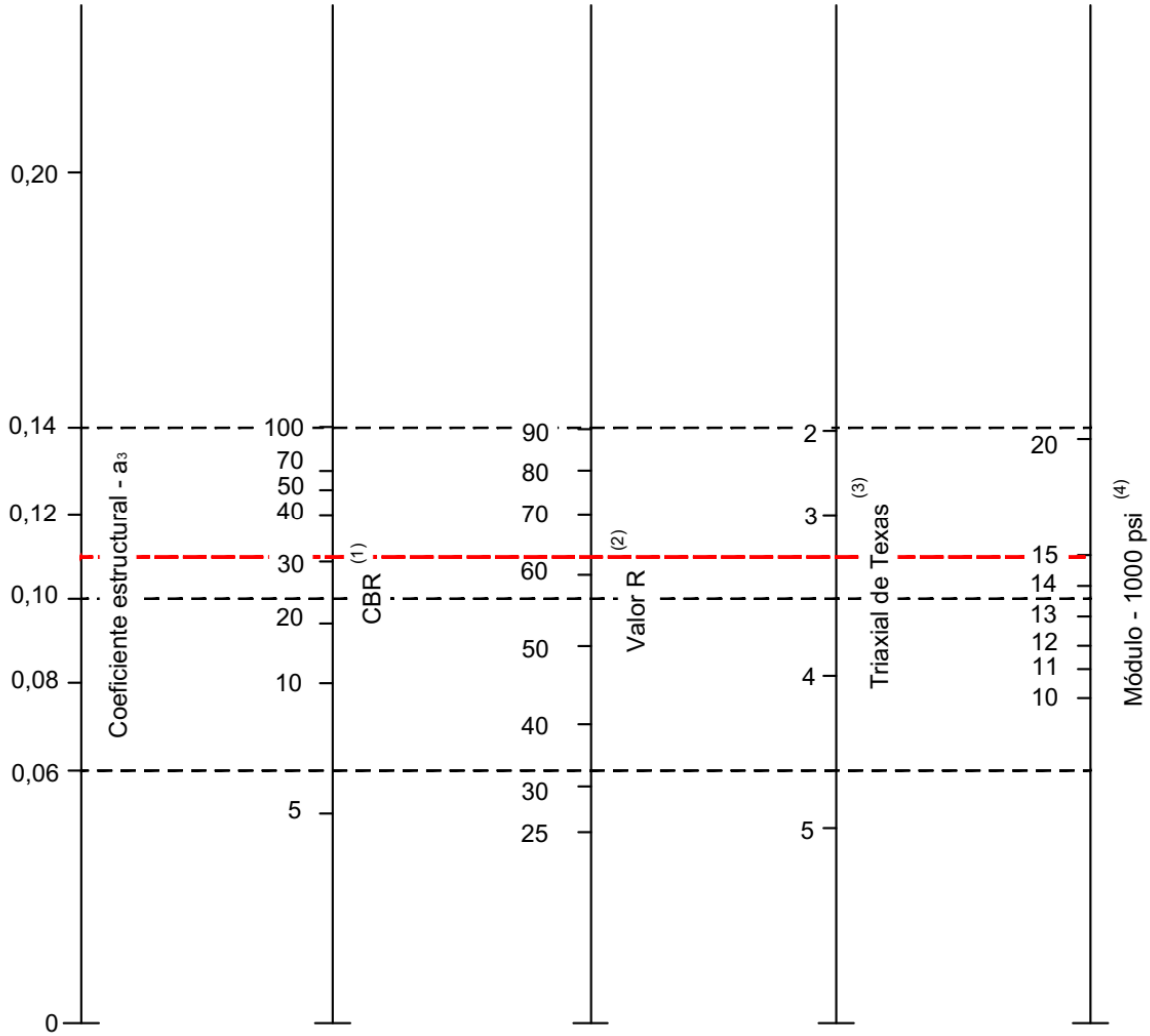


Figura C2-02

Nomograma de módulo resiliente para una subbase granular

Nota: Para este ejemplo de cálculo en específico, los valores de CBR para los materiales granulares fueron obtenidos en el laboratorio.

- iv. Carpeta asfáltica. Con un módulo de 450 000 psi y utilizando la Figura C2-03 Curva de coeficiente estructural contra módulo de la mezcla asfáltica se obtiene un coeficiente estructural a_1 de 0,45.

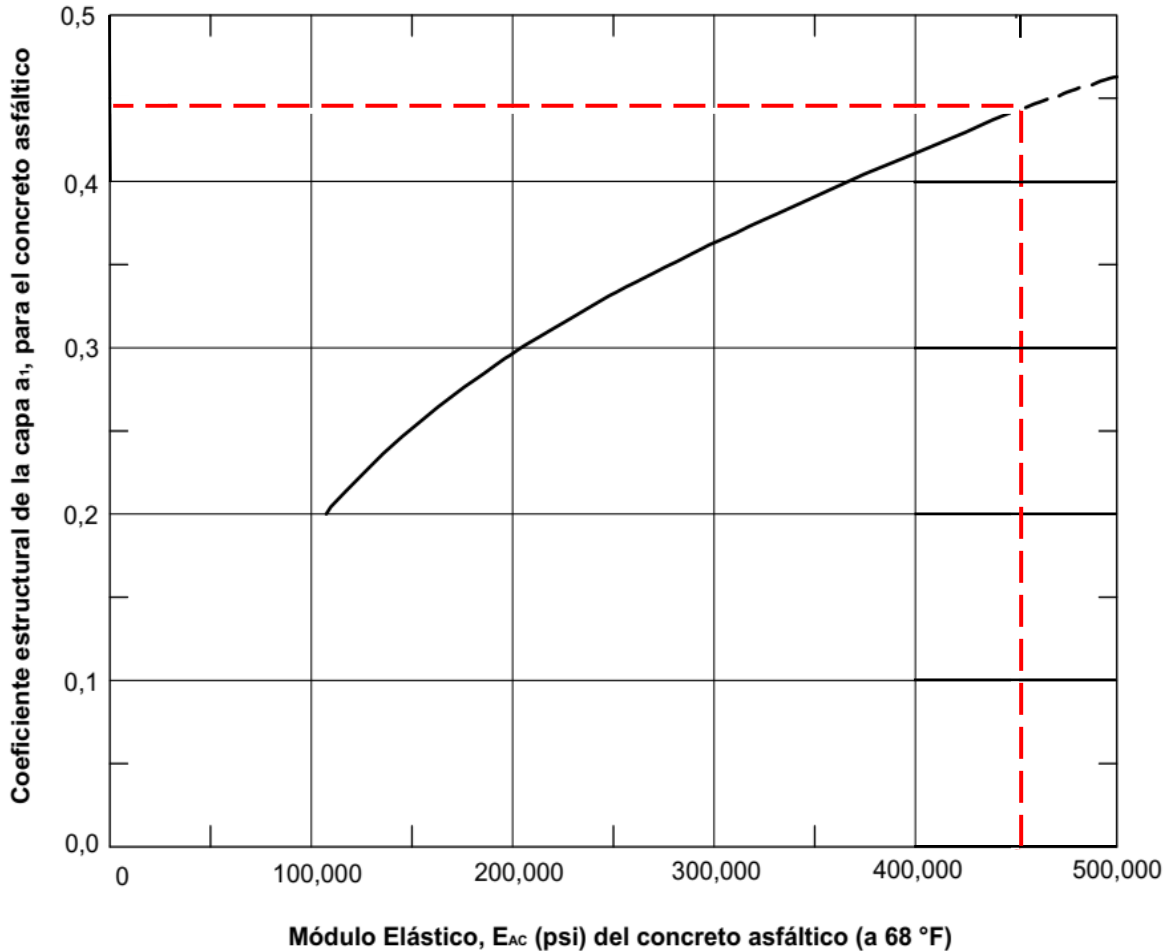


Figura C2-03

Curva de coeficiente estructural contra módulo de la mezcla asfáltica

9. Estimación de espesores

- i. Serviciabilidad inicial $P_0 = 4,2$, valor común para pavimento flexible.
- ii. Serviciabilidad final $P_t = 2,5$ por ser tránsito alto.

$$\Delta PSI = P_0 - P_t = 4,2 - 2,5 = 1,7$$

- iii. Coeficiente de corrección por drenaje. De acuerdo con los resultados del estudio hidrológico de la zona del proyecto, se determinó que existe un drenaje regular y más del 25 % del tiempo expuesto a condiciones de humedad, el valor de m es igual a 0,8 (ver Tabla 206-01 Definiciones generales de los diferentes niveles de drenaje de la estructura del pavimento, de la Sección 206 Condiciones de Drenaje de la presente guía).

- iv. Nivel de confianza. Considerando la carretera como una autopista de alto volumen, se utiliza las recomendaciones de AASHTO-93, nivel de confianza de 95 %, $Z_r = -1,645$ y $S_o = 0,45$.
- v. SN_1 requerido sobre la base. Con un CBR de 100, el módulo resiliente asociado según los nomogramas de AASHTO (Figura C1-01 Nomograma de módulo resiliente para una base granular) es de 30 000 psi.

Dicho valor de módulo se utiliza como insumo, al igual que los parámetros de diseño presentados anteriormente, para determinar el número estructural que debe poseer la capa que se encuentra encima de la base. Para esto utilizamos la Ecuación 207-04 presentada en la Sección 207 Coeficientes Estructurales de la presente guía, misma que se muestra a continuación:

$$\text{Log}_{10}W_{18} = Z_r * S_o + 9,36 * \text{Log}_{10}(SN_1 + 1) - 0,20 + \frac{\text{Log}_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5}\right)}{\frac{0,40 + 1094}{(SN_1 + 1)^{5,19}}} + 2,32 * \text{Log}_{10}M_r - 8,07$$

$$\text{Log}_{10}(32\ 015\ 141) =$$

$$-1,645 * 0,45 + 9,36 * \text{Log}_{10}(SN_1 + 1) - 0,20 + \frac{\text{Log}_{10}\left(\frac{1,7}{4,2 - 1,5}\right)}{\frac{0,40 + 1094}{(SN_1 + 1)^{5,19}}} + 2,32 * \text{Log}_{10}(30\ 000) - 8,07$$

Despejando el valor de SN_1 se obtiene:

$$SN_1 = 3,845$$

- vi. SN_2 requerido sobre la subbase. Es necesario conocer el módulo resiliente de la capa, este puede obtenerse con los nomogramas de AASHTO-93 o por medio de las ecuaciones de correlación. A continuación, se muestra el cálculo con las dos formas, se observa que, con los nomogramas, el valor estimado del módulo resiliente es muy similar a la ecuación de correlación recomendada para materiales granulares.

Utilizando la Figura C1-02 Nomograma de módulo resiliente para una subbase granular se obtiene un valor de 15 000 psi. Con el módulo resiliente de la subbase, es posible calcular el SN_2 requerido sobre la subbase:

$$\text{Log}_{10}W_{18} = Z_r * S_o + 9,36 * \text{Log}_{10}(SN_1 + 1) - 0,20 + \frac{\text{Log}_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5}\right)}{\frac{0,40 + 1094}{(SN_1 + 1)^{5,19}}} + 2,32 * \text{Log}_{10}M_r - 8,07$$

$$\begin{aligned} & \text{Log}_{10}(32\ 015\ 141) = \\ & -1,645 * 0,45 + 9,36 * \text{Log}_{10}(SN_2 + 1) - 0,20 + \frac{\text{Log}_{10}\left(\frac{1,7}{4,2 - 1,5}\right)}{\frac{0,40 + 1094}{(SN_2 + 1)^{5,19}}} + 2,32 * \text{Log}_{10}(15\ 000) - 8,07 \end{aligned}$$

Despejando SN_2 se obtiene el siguiente valor:

$$SN_2 = 4,91$$

- vii. SN_3 requerido sobre la subrasante. Para determinar el valor del número estructural de las capas que se colocan sobre la subrasante, se utilizan las mismas ecuaciones que las utilizadas para determinar el valor de SN_1 y SN_2 , sin embargo, en este caso se utiliza el módulo de la subrasante:

$$\text{Log}_{10}W_{18} = Z_r * S_o + 9,36 * \text{Log}_{10}(SN_1 + 1) - 0,20 + \frac{\text{Log}_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5}\right)}{\frac{0,40 + 1094}{(SN_1 + 1)^{5,19}}} + 2,32 * \text{Log}_{10}M_r - 8,07$$

$$\text{Log}_{10}(32\ 015\ 141) =$$

$$-1,645 * 0,45 + 9,36 * \text{Log}_{10}(SN_2 + 1) - 0,20 + \frac{\text{Log}_{10}\left(\frac{1,7}{4,2 - 1,5}\right)}{\frac{0,40 + 1094}{(SN_2 + 1)^{5,19}}} + 2,32 * \text{Log}_{10}(7\ 500) - 8,07$$

Despejando SN_3 se obtiene:

$$SN_3 = 6,123$$

- viii. Cálculo de Espesores. Para determinar los espesores se sigue el procedimiento descrito en la guía AASHTO-93:

$$D_1^* \geq \frac{SN_1}{a_1} = \frac{3,845}{0,45} = 8,54 \text{ pulg} = 21,7 \text{ cm} \approx 22 \text{ cm}$$

$$SN_1^* = \frac{22}{2,54} * 0,45 = 3,898 \geq SN_1 \text{ Cumple}$$

Seguidamente se calcula el espesor requerido de la base:

$$D_2^* \geq \frac{4,910 - 3,898}{0,14 * 0,8} = 9,04 \text{ pulg} = 22,97 \text{ cm} \approx 25 \text{ cm}$$

$$SN_2^* = D_2^* (\text{pulg}) * m * a_2 = \frac{25 \text{ cm}}{2,54} * 0,14 * 0,8 = 1,102$$

$$SN^*_1 + SN^*_2 \geq SN_2$$

$$3,898 + 1,102 = 5,00 \geq 4,910 \text{ Cumple}$$

ix. Espesor de la capa de subbase.

$$D_3^* \geq \frac{SN_3 - (SN^*_1 + SN^*_2)}{a_3 m_3}$$

$$D_3^* \geq \frac{6,123 - (3,898 + 1,102)}{0,11 * 0,8} = 12,76 \text{ pulg} = 32,41 \text{ cm} \approx 35 \text{ cm}$$



Figura C2-04

Esquema de espesores obtenidos con AASHTO-93 en el ejemplo 1

10. Estimación de las propiedades mecánicas para el diseño Mecanístico-Empírico

- i. Mezcla asfáltica. Con la temperatura promedio del aire, para cada mes del año, se debe calcular la temperatura del pavimento. Para esto se utilizarán los modelos presentados en la Subsección 304.02 Ajuste por Temperatura del Módulo de la Mezcla Asfáltica del presente documento (ecuaciones del SHRP, LTPP, Instituto del Asfalto y Witczak).

Modelo SHRP:

$$T_{sup} = T_{aire} - 0,00618 * Lat^2 + 0,2289 * Lat + 24,4$$

$$T_{pav} = T_{sup}(1 - 0,063 * d + 0,007 * d^2 - 0,0004 * d^3)$$

Donde,

T_{pav} = Temperatura del pavimento en °F.

T_{sup} = Temperatura superficial del pavimento en °F.

Lat = Latitud de la zona en grados decimales.

d = Profundidad en la mezcla asfáltica en pulgadas.

Modelo LTPP:

$$T_{MAC} = 54,32 + 0,78 * T_{aire} - 0,0025 * Lat^2 - 15,14 * \log_{10}(h + 25)$$

Donde,

T_{MAC} = Temperatura del pavimento en °C.

T_{aire} = Temperatura promedio del aire en °C.

Lat = Latitud de la zona en grados decimales.

h = Profundidad en la mezcla asfáltica en mm.

Modelo Instituto del asfalto (IA):

$$T_{pav} = (T_{aire} * 1,8 + 32) \left[1 + \frac{1}{(d + 4)} \right] - \frac{34}{(d + 4)} + 6$$

Donde,

T_{pav} = Temperatura del pavimento en °F.

T_{aire} = Temperatura promedio del aire en °F.

d = Profundidad en la mezcla asfáltica en pulgadas.

Modelo de Witczak, 1992:

$$T_{eff} = 58,0 - 5,5(z) + 0,92(MAAT)$$

Donde,

T_{eff} = Temperatura del pavimento en °F.

z = Profundidad en la mezcla asfáltica en pulgadas.

$MAAT$ = Temperatura media anual del aire en °F.

A continuación, se presenta el cálculo de la temperatura del pavimento para el mes de **enero**, a medida de memoria de cálculo. Los resultados completos se resumen en la Tabla C2-09. Para efectos de estimación del módulo dinámico, se usa el promedio obtenido por los cuatro modelos. Estos datos se presentan en la Tabla C2-10.

Modelo SHRP (mes de enero):

$$Temp_{.sup} = 64,6 - 0,00618 * 9,83^2 + 0,2289 * 9,83 + 24,4 = 90,6^{\circ}F$$

$$T_{pav} = 90,6 * \left(1 - 0,063 * 8,661 + 0,007 * \frac{8,661^2}{2} - 0,0004 * \frac{8,661^3}{2} \right)$$

$$T_{pav} = 74,9^{\circ}F = 23,8^{\circ}C$$

Modelo LTPP (mes de enero):

$$T_{MAC} = 54,32 + 0,78 * 18,1 - 0,0025 * 9,83^2 - 15,14 * \log_{10}\left(\frac{(8,661 * 25,4)}{2} + 25\right)$$

$$T_{MAC} = 35,9^{\circ}C = 96,7^{\circ}F$$

Modelo Instituto del asfalto (IA) (mes de enero):

$$T_{pav} = (18,1 * 1,8 + 32) \left[1 + \frac{1}{\left(\frac{8,661}{2} + 4\right)} \right] - \frac{34}{\left(\frac{8,661}{2} + 4\right)} + 6$$

$$T_{MAC} = 74,3^{\circ}F = 23,5^{\circ}C$$

Modelo de Witczak, 1992 (mes de enero):

$$T_{eff} = 58,0 - 5,5 \left(\frac{8,661}{2} \right) + 0,92(64,6)$$

$$T_{MAC} = 93,6^{\circ}F = 34,2^{\circ}C$$

Tabla C2-09

Resumen de datos de temperatura en el pavimento por mes para los diferentes modelos

Mes	SHRP (°F)	LTPP (°F)	IA (°F)	Witczak (°F)	SHRP (°C)	LTPP (°C)	IA (°C)	Witczak (°C)
---	(°F)	(°F)	(°F)	(°F)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
Enero	74,9	96,7	74,3	93,6	23,8	35,9	23,5	34,2
Febrero	75,3	97,1	74,9	94,1	24,1	36,2	23,8	34,5
Marzo	76,2	98,0	76,1	95,1	24,6	36,6	24,5	35,0
Abril	77,5	99,2	77,9	96,6	25,3	37,3	25,5	35,9
Mayo	78,6	100,2	79,3	97,7	25,9	37,9	26,3	36,5
Junio	78,6	100,2	79,3	97,7	25,9	37,9	26,3	36,5
Julio	77,8	99,5	78,3	96,9	25,5	37,5	25,7	36,1
Agosto	78,1	99,8	78,7	97,2	25,6	37,7	25,9	36,2
Septiembre	78,6	100,2	79,3	97,7	25,9	37,9	26,3	36,5
Octubre	78,3	99,9	78,9	97,4	25,7	37,7	26,0	36,3
Noviembre	76,8	98,5	76,9	95,7	24,9	37,0	24,9	35,4
Diciembre	75,6	97,4	75,3	94,4	24,2	36,3	24,0	34,7

Tabla C2-10*Temperatura promedio mensual del pavimento según la tabla anterior*

Mes	Temperatura media (°F)	Temperatura media (°C)
---	(°F)	(°C)
Enero	84,9	29,4
Febrero	85,3	29,6
Marzo	86,3	30,2
Abril	87,8	31,0
Mayo	89,0	31,6
Junio	89,0	31,6
Julio	88,1	31,2
Agosto	88,5	31,4
Septiembre	89,0	31,6
Octubre	88,6	31,5
Noviembre	87,0	30,5
Diciembre	85,7	29,8

El módulo de la mezcla asfáltica, para cada mes del año, se estimó utilizando el software Pitra ImoDin del LanammeUCR. En las figuras C2-06, C2-07, C2-08, C2-09, C2-10 y C2-11 se muestran las salidas para cada caso y en la tabla C2-11 se presenta un resumen del valor de E* para cada mes. La frecuencia utilizada se determinó con la siguiente ecuación, para una velocidad de diseño de 50 km/h para vehículos pesados.

$$\text{Log}(t) = -0.95 * \text{Log}(v) + 0.0207 * h - 0.087; F = 1/t$$

Donde,

“h” es el espesor medio de la capa y

“v” es la velocidad en millas por hora.

$$\text{Log}(t) = -0.95 * \text{Log}(31,3) + 0.0207 * 4,331 - 0.087 = 0,0376 \text{ s}$$

$$F = 1/0,0376 \text{ Hz}$$

$$F = 26,57 \text{ Hz}$$

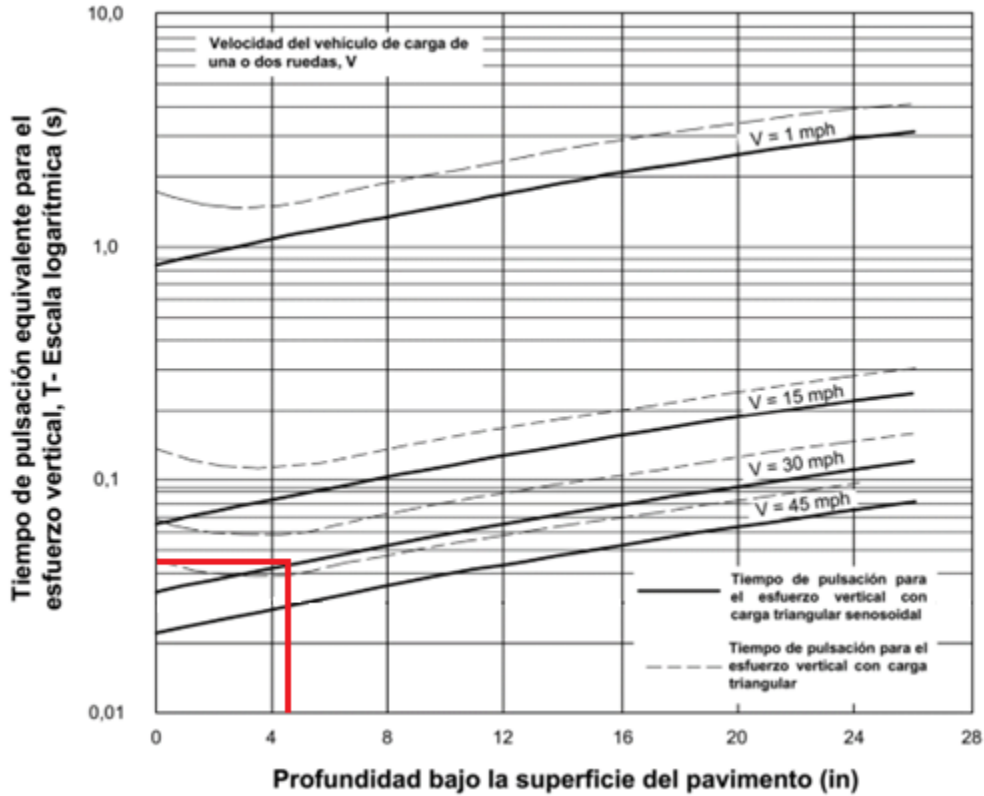


Figura C2-05

Tiempo de pulso equivalente del esfuerzo vertical según la velocidad del vehículo y la profundidad (Gráfico de Barksdale).

Adaptado de National Cooperative Highway Research Program, 2004.



Figura C2-06

Módulo resiliente para enero y febrero

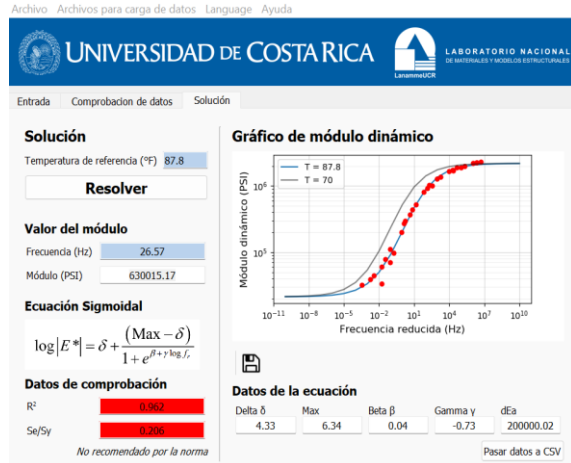
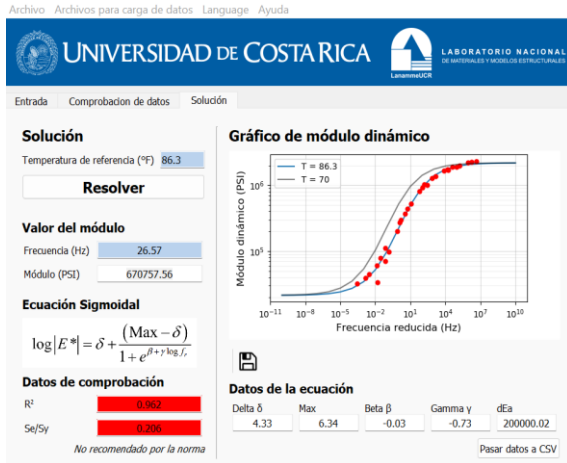


Figura C2-07

Módulo resiliente para marzo y abril

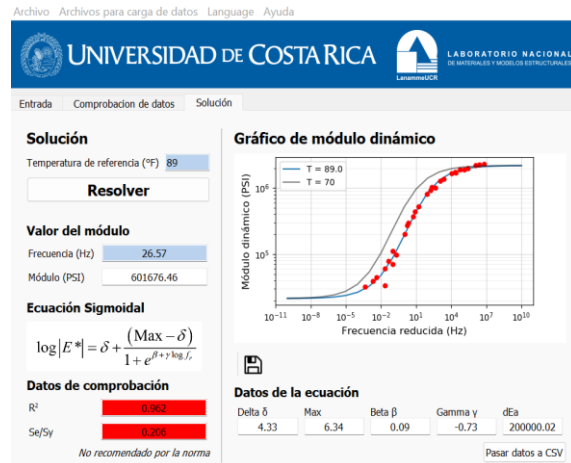
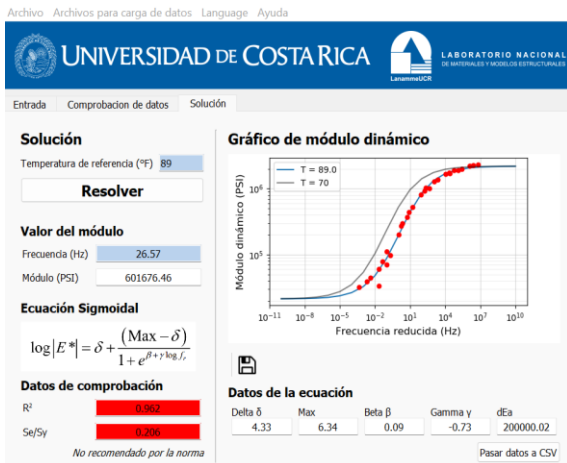


Figura C2-08

Módulo resiliente para mayo y junio

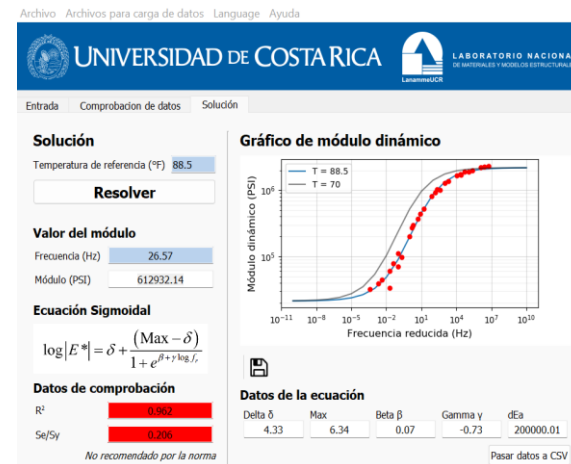
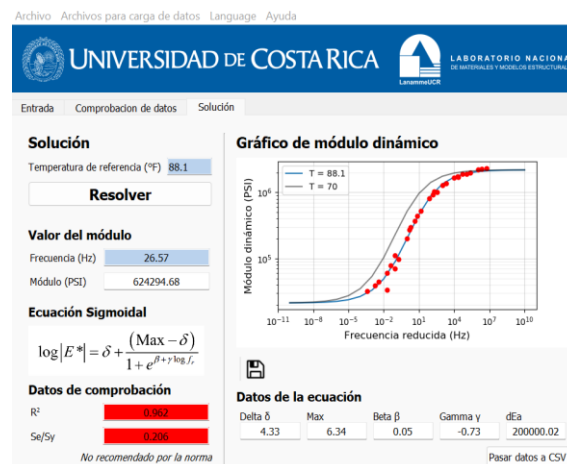


Figura C2-09

Módulo resiliente para julio y agosto

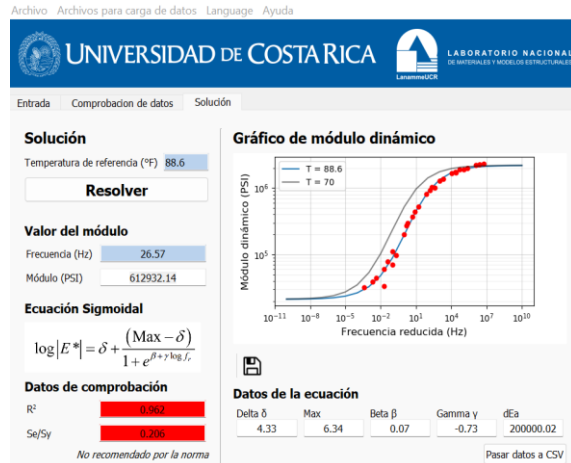
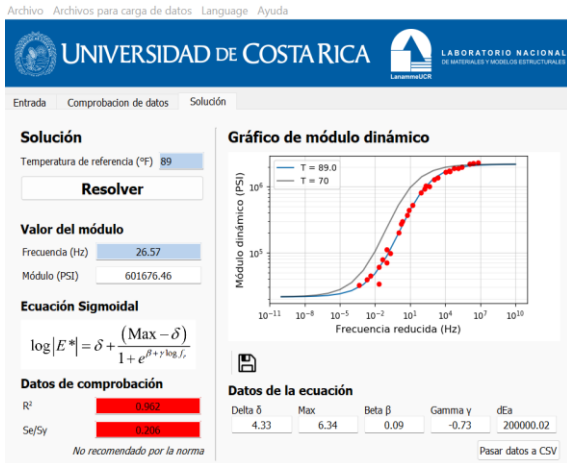


Figura C2-10

Módulo resiliente para setiembre y octubre

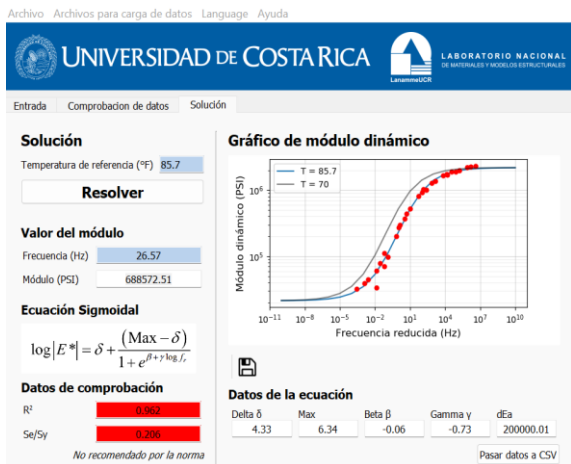
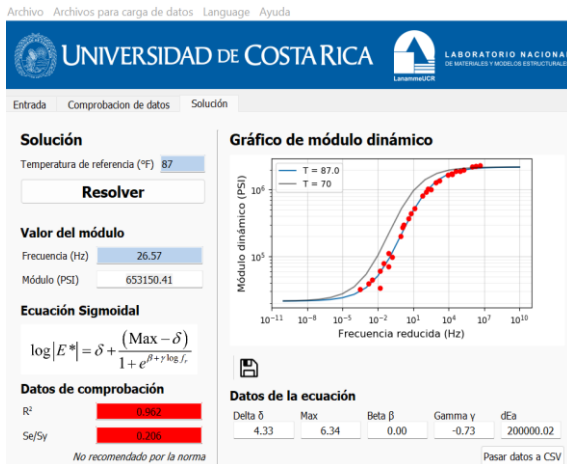


Figura C2-11

Módulo resiliente para noviembre y diciembre

Tabla C2-11

Resumen de módulos dinámicos (E^) de la mezcla asfáltica para cada mes del año*

Mes	Módulo de la carpeta asfáltica (psi)
Enero	712 631
Febrero	700 559
Marzo	670 758
Abril	630 015
Mayo	601 676
Junio	601 676
Julio	624 295
Agosto	612 932
Septiembre	601 676
Octubre	612 932
Noviembre	653 150
Diciembre	688 573
Promedio	642 573

11. Módulo resiliente de la subrasante corregido por condiciones ambientales.

Este valor corresponde al M_R determinado para el diseño, afectado por un factor de reducción ambiental "FU". El valor de reducción depende de la precipitación de la zona (ver Tabla C2-12), saturación máxima del suelo (en este caso y según estudios previos se utilizó un valor de 180mm para el suelo MH de la subrasante (Arias, 2020)), índice de plasticidad y material menor a 75 μm . En este caso el valor de FU obtenido, según la sección 303, y datos climáticos del proyecto es de 0,91. En la tabla C2-13 siguiente se muestra el detalle de esta estimación.

Tabla C2-12
Estimación del TMI

Mes	P (mm)	T (°C)	IC	Evapotransp. mensual (mm)	DM	FCM	Evapotransp. corregida (mm)	AM (mm)	EM (mm)	D (mm)	TMI
Enero	66,2	18,1	7,013	60,820	31	1,000	62,848	180,0	3,352	0,0	5,334
Febrero	52,5	18,4	7,189	62,945	28	0,910	53,461	179,0	0,000	0,0	0,000
Marzo	32,5	19,0	7,547	67,307	31	1,030	71,637	139,9	0,000	0,0	0,000
Abril	59,4	19,9	8,095	74,138	30	1,030	76,362	122,9	0,000	0,0	0,000
Mayo	192,2	20,6	8,530	79,689	31	1,080	88,932	180,0	46,207	0,0	51,958
Junio	205,1	20,6	8,530	79,689	30	1,060	84,470	180,0	120,630	0,0	142,809
Julio	170,8	20,1	8,219	75,702	31	1,080	84,484	180,0	86,316	0,0	102,169
Agosto	174,3	20,3	8,343	77,284	31	1,070	85,450	180,0	88,850	0,0	103,978
Setiembre	247,9	20,6	8,530	79,689	30	1,020	81,282	180,0	166,618	0,0	204,987
Octubre	250,3	20,4	8,405	78,081	31	1,020	82,298	180,0	168,002	0,0	204,140
Noviembre	163,300	19,400	7,789	70,301	30	0,980	68,895	180,0	94,405	0,0	137,029
Diciembre	91,600	18,600	7,308	64,382	31	0,990	65,863	180,0	25,737	0,0	39,077
			95,498				enero*	180,0			

Notas:

P: Precipitación

IC: Índice de calor

DM: Días del mes

FCM: Factor de corrección por mes

AM: Almacenamiento mensual

EM: Exceso mensual

D: Déficit

Tabla C2-13

Estimación de factor de reducción ambiental

	TMI	Succión mensual (kPa)	Succión mensual (psi)	Saturación (%)	log FU	FU
Enero	5,334	98,355	14,265	83,094	0,112	129%
Febrero	0,000	118,551	17,194	80,583	0,167	147%
Marzo	0,000	118,551	17,194	80,583	0,167	147%
Abril	0,000	118,551	17,194	80,583	0,167	147%
Mayo	51,958	32,604	4,729	93,591	-0,130	74%
Junio	142,809	14,697	2,132	97,137	-0,215	61%
Julio	102,169	18,578	2,694	96,351	-0,196	64%
Agosto	103,978	18,329	2,658	96,401	-0,197	63%
Setiembre	204,987	12,157	1,763	97,653	-0,227	59%
Octubre	204,140	12,179	1,766	97,649	-0,227	59%
Noviembre	137,029	15,085	2,188	97,058	-0,213	61%
Diciembre	39,077	40,990	5,945	92,025	-0,093	81%
					Promedio	91,05%

$$M_{RSG \text{ corregida}} = 0,91 * 7\ 500 = 6828 \text{ psi}$$

12. Estimación del módulo resiliente en los materiales granulares.

Para el análisis estructural del pavimento se utiliza un software de multicapa elástica. En este nivel de análisis (Categoría 1), los módulos de los materiales granulares son corregidos de acuerdo con el estado de esfuerzo de cada capa (mitad de la capa). El método consiste en un proceso cíclico que sigue las siguientes etapas:

- i. Proponer un valor inicial de E (el primer valor corresponde al usado en AASHTO 93),
- ii. Determinar los esfuerzos principales a la mitad de la base/subbase.
- iii. Calcular el invariante de esfuerzos (suma de esfuerzos principales más el aporte del peso del material si es requerido)
- iv. Calcular el nuevo valor de E para cada caso (en base a un modelo)
- v. Estimar el error admisible, en término porcentual, entre el módulo inicial y el nuevo. El proceso se repite hasta que la diferencia es menor al 10 %. En todos los cálculos se mantienen constantes los valores de E de la mezcla bituminosa (promedio anual) y suelo de subrasante (afectado por FU).

En este paso la carga utilizada corresponde a un eje simple de 9000 lb (40kN), centrada en 5,352 en el eje “x” y en el eje “y”. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la estimación de los módulos de los materiales granulares. En la Tabla C2-15 se presentan los puntos donde obtuvieron los esfuerzos principales. Y en las Tablas C2-16, C2-17 y C2-18 se presentan las iteraciones efectuadas hasta la convergencia de los resultados. La estructura modelada (resultado del diseño preliminar AASHTO 93) para estimar las respuestas se detalla en la siguiente tabla:

Tabla C2-14*Estructura de pavimento preliminar*

	Poisson	Espesor	Espesor	Módulo
	---	in	cm	psi
Mezcla asfáltica	0,35	8,661	22	642 573
Base granular	0,40	9,843	25	(1)
Subbase granular	0,40	13,780	35	(1)
Subrasante	0,45			6828

Nota:

(1) Módulo semilla, variable para cada iteración

Tabla C2-15*Puntos donde se estimaron los esfuerzos principales para un eje simple*

Punto	x Coord.	y Coord.	z Coord.	Descripción
---	in	in	in	---
1	5,352	5,352	0,001	Capa superior de CA
2	5,352	5,352	4,331	Mitad de capa de CA
3	5,352	5,352	8,660	Fibra inferior de CA
4	5,352	5,352	13,583	Mitad de la base
5	5,352	5,352	25,394	Mitad de la subbase
6	5,352	5,352	32,285	Sobre la subrasante
7	5,352	5,352	38,284	6 in debajo de SG

Los módulos de las capas base y subbase se estimaron con tres modelos de predicción. Estos fueron calibrados para los materiales específicos propuestos para este diseño. A continuación, se describen los modelos para cada caso:

Módulo de la base (modelo 1):

$$M_r = 1635.1 * P_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{0.312} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{-0.021}$$

P_a es la presión atmosférica. El invariante de esfuerzos θ corresponde a la sumatoria de los esfuerzos principales. En este caso se incluye el efecto del peso propio del material. La expresión utilizada es la siguiente:

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \frac{\gamma * z * 9.11 * (1 + 2 * k_0)}{1000}$$

$$\tau_{OCT} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} \text{ (Kpa)}$$

Donde, σ_1 , σ_2 y σ_3 son los esfuerzos principales en kPa (calculados para el caso de una llanta simple de 9000 lb y una presión de contacto de 100 psi), γ es la densidad del material en kg/m³, z en la profundidad al centro de la capa en metros y k_0 es el coeficiente presión en reposo. En este caso el valor de k_0 es de 1,5; sin embargo, este valor deberá ser determinado para cada proyecto.

Módulo de la base (modelo 2):

$$M_r = 39930 * \theta^{0.308}$$

Módulo de la base (modelo 3):

$$M_r = 2806.3 * P_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{0.138} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{-0.056}$$

Módulo de la subbase (modelo 1):

$$M_r = 1633,5 * P_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{0.316} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{-0.029}$$

Módulo de la subbase (modelo 2):

$$M_r = 65870,3 * \theta^{0.213}$$

Módulo de la subbase (modelo 3):

$$M_r = 36154,1 * \theta^{0.308}$$

Primera iteración para corrección de módulos resilientes

Los esfuerzos principales, calculados al centro de la base y subbase, para la estructura resultante de AASHTO 93 son los siguientes:

Al centro de la base:

$$\sigma_1 = 32,49 \text{ kpa}; \sigma_2 = -9,09 \text{ kpa} \text{ y } \sigma_3 = -9,12 \text{ kpa}$$

Al centro de la subbase:

$$\sigma_1 = 12,49 \text{ kpa}; \sigma_2 = -4,55 \text{ kpa} \text{ y } \sigma_3 = -4,57 \text{ kpa}$$

Para efectos de cálculos, los valores que se utilizan corresponden al valor absoluto para cada caso de esfuerzo. A continuación, se muestra cálculo para primera iteración.

Módulo de la base (modelo 1):

$$\theta = 32,49 + 9,09 + 9,12 + \frac{2000 * 0,35 * 9,11 * (1 + 2 * 1,5)}{1000}$$

$$\theta = 75,84 \text{ kpa}$$

$$\tau_{OCT} = \frac{1}{3} \sqrt{(32,49 - 9,09)^2 + (9,09 - 9,12)^2 + (32,49 - 9,12)^2}$$

$$\tau_{OCT} = 11,03 \text{ kpa}$$

$$M_r = 1635.1 * 88,38 * \left(\frac{75,84}{88,38}\right)^{0.312} \left(\frac{11,03}{88,38} + 1\right)^{-0.021}$$

$$M_r = 137\,436 \text{ kpa} = 19\,933 \text{ psi}$$

Módulo de la base (modelo 2):

$$M_r = 39930 * 75,84^{0.308}$$

$$M_r = 151\,466 \text{ kpa} = 21\,968 \text{ psi}$$

Módulo de la base (modelo 3):

$$M_r = 2806.3 * 88,38 * \left(\frac{75,84}{88,38}\right)^{0.138} \left(\frac{11,03}{88,38} + 1\right)^{-0.056}$$

$$M_r = 241\,247 \text{ kpa} = 34\,990 \text{ psi}$$

Módulo de la subbase (modelo 1):

$$\theta = 12,49 + 4,55 + 4,57 + \frac{2000 * 0,65 * 9,11 * (1 + 2 * 1,5)}{1000}$$

$$\theta = 68,62 \text{ kpa}$$

$$\tau_{\text{OCT}} = \frac{1}{3} \sqrt{(12,49 - 4,55)^2 + (4,55 - 4,57)^2 + (12,49 - 4,57)^2}$$

$$\tau_{\text{OCT}} = 3,74 \text{ kpa}$$

$$M_r = 1633,5 * 88,38 * \left(\frac{68,62}{88,38}\right)^{0.316} \left(\frac{3,74}{88,38} + 1\right)^{-0.029}$$

$$M_r = 133\,116 \text{ kpa} = 19\,307 \text{ psi}$$

Módulo de la subbase (modelo 2):

$$M_r = 65870 * 68,62^{0.308}$$

$$M_r = 162\,129 \text{ kpa} = 23\,515 \text{ psi}$$

Módulo de la subbase (modelo 3):

$$M_r = 36154,1 * 68,62^{0.308}$$

$$M_r = 132\,982 \text{ kpa} = 19\,287 \text{ psi}$$

Tabla C2-16*Primera iteración en el proceso de estimación de módulos de las capas granulares*

Punto	σ_1	σ_2	σ_3	θ	T_{oct}	E Modelo 1	E Modelo 2	E Modelo 3	E Inicial	E Promedio	error
---	(Kpa)	(Kpa)	(Kpa)	(Kpa)	(Kpa)	(psi)	(psi)	(psi)	(psi)	(psi)	%
4	32,49	-9,09	-9,12	75,8	11,0	19933	21968	34990	30000	25631	14.6
5	12,49	-4,55	-4,57	68,6	3,74	19307	23515	19287	15000	20703	-38.0

Tabla C2-17*Segunda iteración en el proceso de estimación de módulos de las capas granulares*

Punto	σ_1	σ_2	σ_3	θ	T_{oct}	E Modelo 1	E Modelo 2	E Modelo 3	E Inicial	E Promedio	error
---	(Kpa)	(Kpa)	(Kpa)	(Kpa)	(Kpa)	(psi)	(psi)	(psi)	(psi)	(psi)	%
4	34,16	-2,62	-2,65	64.57	14.86	18,942	20,906	34,149	25631	24666	3.8
5	13,17	-6,90	-6,93	74.00	2.95	19,778	23,896	19,741	20703	21138	-2.1

Tabla C2-18*Tercera iteración en el proceso de estimación de módulos de las capas granulares*

Punto	σ_1	σ_2	σ_3	θ	T_{oct}	E Modelo 1	E Modelo 2	E Modelo 3	E Inicial	E Promedio	error
---	(Kpa)	(Kpa)	(Kpa)	(Kpa)	(Kpa)	(psi)	(psi)	(psi)	(psi)	(psi)	%
4	34.06	-1.78	-1.81	62.79	15.21	18,776	20,727	34,011	24666	24,505	0.7%
5	13.25	-7.00	-7.02	74.27	2.94	19,800	23,914	19,763	21138	21,159	-0.1%

13. Análisis estructural.

Consiste en estimar las respuestas críticas de la estructura. En el caso de la capa asfáltica se utiliza el módulo de la mezcla asfáltica corregido por temperatura (642 573 psi, calculado previamente, ver tabla C2-11). Los módulos de base y subbase corresponden a 24 505 psi y 21 159 psi respectivamente, estos valores son resultado del proceso de iteración descrito en el inciso anterior. Para seleccionar los puntos de medición de las respuestas mecánicas, en el software de análisis, se toman en cuenta los puntos recomendados para un eje simple dual, tal como se muestra en la siguiente figura:

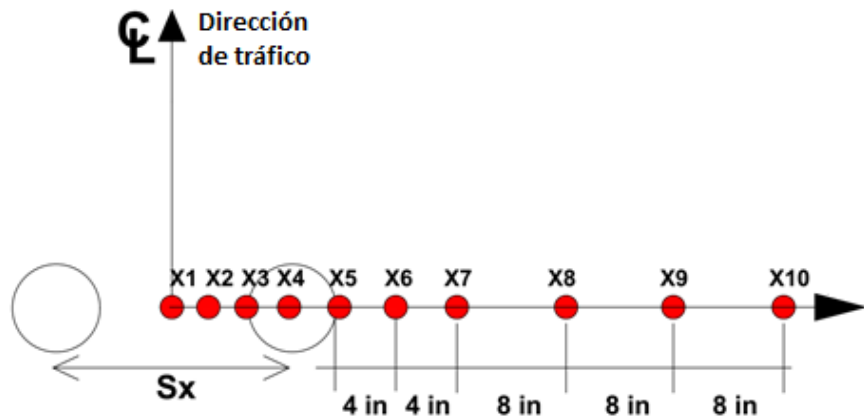


Figura C2-12

Vista superior de los puntos de análisis recomendados

En la figura anterior se muestra una vista superior del pavimento (el eje “y” representa la dirección del tránsito), los círculos blancos ilustran el área de carga o huella de los neumáticos del eje dual, mientras que los círculos pequeños de color rojo muestran los puntos de medición de los esfuerzos, deformaciones unitarias y deflexiones.

En la siguiente figura se muestra la ubicación de las cargas y los puntos de análisis mencionados previamente, con el sistema de coordenadas utilizado las cargas para un eje simple dual se ubican en: carga 1, $x=3,785in$, $y=3,785in$; carga 2, $x=3,785in$, $y=18,355in$. Esto para una separación de $14,57in$ ($37cm$) y un radio de carga de $3,785in$.

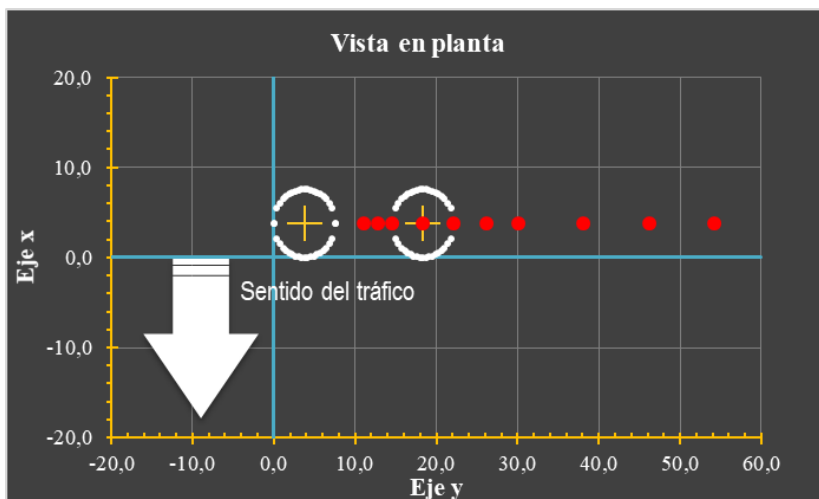


Figura C2-13

Vista superior de los puntos de análisis utilizados

Se determinaron las respuestas estructurales en 40 puntos (7 profundidades). Los primeros 20 se distribuyeron sobre la capa bituminosa, al centro y en la fibra inferior de esta. En el caso de la base y subbase, las mediciones se efectuaron a la mitad de la capa, finalmente se analizó sobre la subrasante y 6 pulgadas (152 mm) por debajo de esta. Las profundidades (coordenada z) de los puntos de análisis se presentó en la sección anterior (Tabla C2-15).

14. Resultados.

A continuación, se muestran los resultados de la modelación (software de multicapa elástica, sin desviación lateral), ver tablas Tabla C2-19, C2-20, C2-21, C2-22, C2-23, C2-24 y C2-25. En color se resaltan las deformaciones críticas, que posteriormente se usaran para determinar el desempeño de la estructura.

Tabla C2-19

Deformaciones obtenidas del análisis estructural (Fibra superior de mezcla asfáltica)

---	Coordenadas			Deformación unitaria normal	Deformación unitaria normal	Deformación unitaria normal	Punto de acuerdo
	x	y	z	x-x (Micro-Strain)	y-y (Micro-Strain)	z-z (Micro-Strain)	Figura C2-12
1	3,785	11,070	0,001	91,462	33,708	-67,189	---
2	3,785	12,820	0,001	94,153	31,284	-67,080	---
3	3,785	14,570	0,001	107,500	34,733	-50,341	---
4	3,785	18,355	0,001	103,850	78,765	-1,395	---
5	3,785	22,140	0,001	96,415	51,404	-8,007	---
6	3,785	26,140	0,001	62,122	11,922	-39,918	---
7	3,785	30,140	0,001	47,546	1,951	-26,632	---
8	3,785	38,140	0,001	29,841	-9,265	-11,084	---
9	3,785	46,140	0,001	19,710	-11,956	-4,173	X9
10	3,785	54,140	0,001	13,535	-11,829	-0,920	---

Tabla C2-20*Deformaciones obtenidas del análisis estructural (Fibra intermedia de mezcla asfáltica)*

	Coordenadas			Deformación unitaria normal x-x	Deformación unitaria normal y-y	Deformación unitaria normal z-z	Punto de acuerdo Figura C2-12
	x	y	z	(Micro-Strain)	(Micro-Strain)	(Micro-Strain)	---
1	3,785	11,070	4,331	-9,649	18,528	0,293	---
2	3,785	12,820	4,331	-11,425	15,640	6,694	---
3	3,785	14,570	4,331	-16,194	4,016	28,222	---
4	3,785	18,355	4,331	-23,111	-20,819	69,358	X4
5	3,785	22,140	4,331	-15,677	-1,630	33,615	---

Tabla C2-21*Deformaciones obtenidas del análisis estructural (Fibra inferior de mezcla asfáltica)*

	Coordenadas			Deformación unitaria normal x-x	Deformación unitaria normal y-y	Deformación unitaria normal z-z	Punto de acuerdo Figura C2-12
	x	y	z	(Micro-Strain)	(Micro-Strain)	(Micro-Strain)	---
1	3,785	11,070	8,660	-95,381	-38,452	77,274	---
2	3,785	12,820	8,660	-95,922	-42,061	79,585	---
3	3,785	14,570	8,660	-97,164	-51,750	85,666	X3
4	3,785	18,355	8,660	-96,036	-67,232	93,555	---
5	3,785	22,140	8,660	-82,799	-44,705	73,326	---

Tabla C2-22*Deformaciones obtenidas del análisis estructural (Centro de la base)*

	Coordenadas			Deformación unitaria normal x-x	Deformación unitaria normal y-y	Deformación unitaria normal z-z	Punto de acuerdo Figura C2-12
	x	y	z	(Micro-Strain)	(Micro-Strain)	(Micro-Strain)	---
1	3,785	11,070	13,583	-76,428	-53,958	162,290	---
2	3,785	12,820	13,583	-76,264	-54,227	162,310	X2
3	3,785	14,570	13,583	-75,692	-54,765	161,990	---
4	3,785	18,355	13,583	-72,439	-52,725	155,150	---
5	3,785	22,140	13,583	-65,833	-41,565	134,400	---

Tabla C2-23*Deformaciones obtenidas del análisis estructural (Centro de la subbase)*

---	Coordenadas			Deformación unitaria normal x-x	Deformación unitaria normal y-y	Deformación unitaria normal z-z	Punto de acuerdo Figura C2-12
	x	y	z	(Micro-Strain)	(Micro-Strain)	(Micro-Strain)	---
1	3,785	11,070	25,394	-60,855	-55,312	116,560	X1
2	3,785	12,820	25,394	-60,744	-55,055	116,200	---
3	3,785	14,570	25,394	-60,393	-54,236	115,040	---
4	3,785	18,355	25,394	-58,839	-50,594	109,910	---
5	3,785	22,140	25,394	-56,309	-44,658	101,550	---

Tabla C2-24*Deformaciones obtenidas del análisis estructural (fibra superior de la subrasante)*

---	Coordenadas			Deformación unitaria normal x-x	Deformación unitaria normal y-y	Deformación unitaria normal z-z	Punto de acuerdo Figura C2-12
	x	y	z	(Micro-Strain)	(Micro-Strain)	(Micro-Strain)	---
1	3,785	11,070	32,285	-72,455	-67,314	161,320	X1
2	3,785	12,820	32,285	-72,343	-67,023	160,890	---
3	3,785	14,570	32,285	-71,988	-66,103	159,530	---
4	3,785	18,355	32,285	-70,421	-62,069	153,560	---
5	3,785	22,140	32,285	-67,861	-55,593	143,920	---

Tabla C2-25*Deformaciones obtenidas del análisis estructural (6" por debajo de la subrasante)*

---	Coordenadas			Deformación unitaria normal x-x	Deformación unitaria normal y-y	Deformación unitaria normal z-z	Punto de acuerdo Figura C2-12
	x	y	z	(Micro-Strain)	(Micro-Strain)	(Micro-Strain)	---
1	3,785	11,070	38,284	-58,484	-55,231	131,900	X1
2	3,785	12,820	38,284	-58,411	-55,030	131,610	---
3	3,785	14,570	38,284	-58,180	-54,395	130,680	---
4	3,785	18,355	38,284	-57,156	-51,603	126,630	---
5	3,785	22,140	38,284	-55,471	-47,090	120,030	---

15. Verificación del agrietamiento por fatiga (abajo hacia arriba)

Según el modelo AASHTOWare calibrado para Costa Rica:

$$M = 4,84 \left[\frac{11,33}{4 + 11,33} - 0,69 \right] = 0,237$$

$$C = 10^{0,297} = 1,728$$

Para agrietamiento de abajo-arriba:

$$k'_1 = \frac{1}{0,000398 + \frac{0,003602}{1 + e^{(11,02 - 3,49 * 8,661)}}} = 250,00$$

$$N_f = 0,007566 * C * k'_1 * bf_1 \left(\frac{1}{\epsilon_t} \right)^{(3,9492 * bf_2)} \left(\frac{1}{E^*} \right)^{(1,281 * bf_3)}$$

Donde los parámetros bf_1 , bf_2 y bf_3 son factores de calibración locales para Costa Rica, que en este caso tienen valores de: $bf_1 = 0,9739$, $bf_2 = 0,9948$ y $bf_3 = 1,0907$. Sustituyendo en la ecuación anterior:

$$\begin{aligned} N_f &= 0,007566 * 1,728 * 250,00 * 0,9739 * \left(\frac{1}{97,16 * 10^{-6}} \right)^{(3,9492 * 0,9948)} \left(\frac{1}{642\,573 \text{ psi}} \right)^{(1,281 * 1,0907,772)} \\ &= 141\,838\,620 \end{aligned}$$

En este caso, las cargas admisibles para que la estructura falle por fatiga son mayores que los ESAL's de diseño, este valor servirá de insumo para calcular el porcentaje de área agrietada a lo largo de la vida de diseño de la estructura de pavimento. Es importante tener en cuenta que la estructura debe cumplir con los criterios de área agrietada (mostrados en la Subsección 102.04 Criterios de desempeño y Niveles de Confiabilidad).

Daño acumulado y porcentaje de agrietamiento

El cálculo del daño se realiza con base en la teoría de Miner, por lo tanto, se utiliza la Ecuación 402-06 mostrada en la Sección 402 Daño Acumulado y Desviación Lateral de esta guía. Dicho porcentaje de daño acumulado posee un error estándar asociado (S_e) que se utiliza para corregir el porcentaje de agrietamiento calculado. El error se calcula con la expresión de la Ecuación 504-05 o 504-06. Para determinar el área agrietada considerando la confiabilidad, se utilizan las expresiones que se presentan en las Ecuaciones 502-07 y 504-07.

$$D = \sum_{i=1}^T \frac{n_i}{N_{fi}}$$

Donde,

D = Daño.

T = Total de períodos.

n_i = Tránsito real en el período i .

N_{fi} = Tránsito permitido bajo las condiciones de servicio en el período i .

$$FC_{B-U} = \left(\frac{6000}{1 + e^{(C_1 * C'_1 + C_2 * C''_2 * \log(D_B * 100))}} \right) * \left(\frac{1}{60} \right) \quad \text{Ec. 502-07}$$

Donde,

FC_{B-U} = Agrietamiento de abajo hacia arriba por fatiga, porcentaje por área de carril en porcentaje.

D_B = Daño por fatiga de abajo hacia arriba, en decimal.

$$C'_1 = -2 * C''_2$$

$$C''_2 = -2,40874 - 39,748 * (1 + h_{AC})^{-2,856}$$

$C_1 = 4,0$ (Factor local para Costa Rica)

$C_2 = 3,7969$ (Factor local para Costa Rica)

h_{AC} = Espesor de MAC en pulgadas.

$$S_e = 0,5 + \frac{12}{1 + e^{1,308 - 2,949 * \log D}}$$

$$FC_{B-U} - P = FC_{B-U} + S_e FC_{B-U} * Z_p$$

Donde,

$FC_{B-U} - P$ = Agrietamiento de abajo hacia arriba por fatiga, porcentaje por área de carril, ajustado a nivel de confianza del Proyecto.

FC_{B-U} = Agrietamiento de abajo hacia arriba por fatiga, porcentaje por área de carril, al 50 % de confiabilidad.

$S_e FC_{B-U}$ = Error estándar agrietamiento de abajo hacia arriba por fatiga.

Z_p = Valor de "z" de la distribución normal estándar para el nivel de confianza definido.

Para el nivel de análisis establecido (más de 25 millones de ejes equivalentes de diseño), se utilizó un 95 % de confiabilidad. En la Tabla C2-26 se muestra un resumen del daño

acumulado por año y el porcentaje de área agrietada FC_{B-U} . A continuación, se presenta a modo de ejemplo, la memoria de cálculo para el año 15:

El primer paso consiste en la estimación de los ESAL's acumulados en el año de interés (año 15 en este caso).

$$ESAL \text{ año } 15 = 23\,021\,499$$

El segundo paso consiste en determinar el daño acumulado al año de interés.

$$D = \sum_{i=1}^{15} \frac{23\,021\,499}{141\,838\,620} = 16,2 \%$$

$$C''_2 = -2,40874 - 39,748 * (1 + 8,661)^{-2,856} = -2,470$$

$$C'_1 = -2 * (-2,470) = 4,94$$

$$C_1 = 4,0 \text{ (Factor local para Costa Rica)}$$

$$C_2 = 3,7969 \text{ (Factor local para Costa Rica)}$$

$$FC_{B-U} = \left(\frac{6000}{1 + e^{(4*4,94+3,779*-2,40*\log(0,162*100))}} \right) * \left(\frac{1}{60} \right) = 0,022 \%$$

$$S_e = 0,5 + \frac{12}{1 + e^{1,308-2,949*\log(0,162*100)}} = 11,367 \%$$

$$Z_{95\%} = 1,645 \text{ (recuperado de distribución normal estándar)}$$

$$FC_{B-U} = 0,022 + 11,367 * 1,645 = 18,72\,20,289\%$$

Tabla C2-26

Resultados de daño acumulado y porcentaje de agrietamiento

Año	ESAL's año	ESAL's acumulado	Daño acumulado (%)	Se	FC (%)	FC confiabilidad (95 %)
1	1372046	1372046	1,0 %	0,000	2,969	4,884
2	1393626	2765672	1,9 %	0,000	5,164	8,495
3	1414740	4180413	2,9 %	0,000	6,729	11,068
4	1436320	5616733	4,0 %	0,000	7,841	12,897
5	1457900	7074633	5,0 %	0,000	8,650	14,229
6	1485942	8560575	6,0 %	0,000	9,259	15,231
7	1501526	10062101	7,1 %	0,001	9,725	15,997
8	1536826	11598928	8,2 %	0,001	10,094	16,605
9	1551614	13150541	9,3 %	0,002	10,389	17,090
10	1580121	14730663	10,4 %	0,004	10,630	17,488
11	1609426	16340089	11,5 %	0,006	10,830	17,819
12	1624679	17964768	12,7 %	0,008	10,997	18,097
13	1660911	19625679	13,8 %	0,012	11,140	18,335
14	1683423	21309102	15,0 %	0,016	11,262	18,540
15	1712397	23021499	16,2 %	0,022	11,367	18,720
16	1741836	24763335	17,5 %	0,030	11,460	18,880
17	1764814	26528148	18,7 %	0,040	11,540	19,022
18	1794719	28322867	20,0 %	0,052	11,612	19,152
19	1830951	30153819	21,3 %	0,067	11,676	19,272
20	1861323	32015141	22,6 %	0,085	11,733	19,384

En la tabla anterior se puede observar que el daño alcanza un valor de 19,384 % en el periodo de diseño de 20 años. Este valor supera en más del doble el límite máximo permitido (10 %). La evolución del daño a través del tiempo se presenta en la Figura C2-14. En la Figura C2-15 se muestra el porcentaje de área agrietada para el mismo lapso.

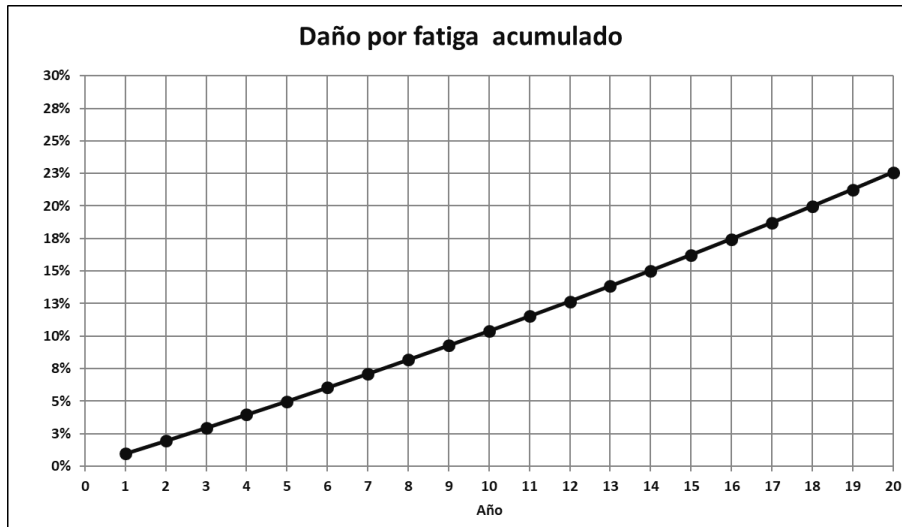


Figura C2-14

Porcentaje de daño acumulado para la estructura original

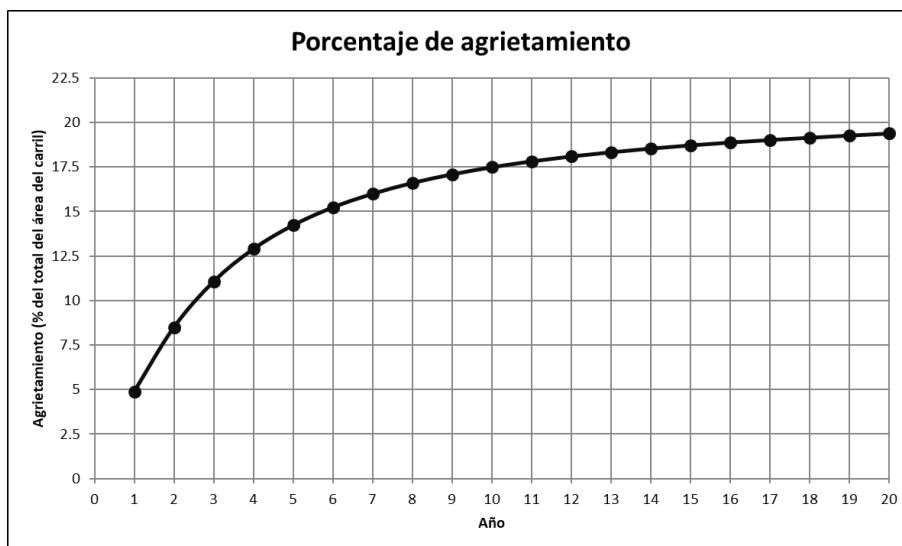


Figura C2-15

Porcentaje de agrietamiento para la estructura original

16. Verificación del agrietamiento por fatiga (arriba hacia abajo)

Según el modelo AASHTOWare calibrado para Costa Rica:

$$M = 4,84 \left[\frac{11,33}{4 + 11,33} - 0,69 \right] = 0,237$$

$$C = 10^{0,297} = 1,728$$

Para agrietamiento de arriba hacia abajo:

$$k'_1 = \frac{1}{0,01 + \frac{12}{1 + e^{(15,76 - 2,8186 * 8,661)}}} = 0,0832$$

$$N_f = 0,007566 * C * k'_1 * bf_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{(3,9492 * bf_2)} \left(\frac{1}{E^*}\right)^{(1,281 * bf_3)}$$

Donde los parámetros b_1 , b_2 y b_3 son factores de calibración locales para Costa Rica, que en este caso tienen valores de: $bf_1 = 0,9739$, $bf_2 = 0,9948$ y $bf_3 = 1,0907$. Sustituyendo en la ecuación anterior:

$$\begin{aligned} N_f &= 0,007566 * 1,728 * 0,0832 * 0,9739 * \left(\frac{1}{11,96 * 10^{-6}}\right)^{(3,9492 * 0,9948)} \left(\frac{1}{642\,573\,psi}\right)^{(1,281 * 1,0907)} \\ &= 177\,479\,899 \end{aligned}$$

En este caso, las cargas admisibles para que la estructura falle por fatiga son mayores que los ESAL's de diseño. Es posible intuir que no es necesario efectuar ajustes para alcanzar deterioros dentro de los límites establecidos (para este tipo de daño).

Daño acumulado y longitud de grietas

El cálculo del daño, al igual que en caso anterior, se realiza con base en la teoría de Miner, por lo tanto, se utiliza la Ecuación 402-06 mostrada en la Sección 402 Daño Acumulado y Desviación Lateral de esta guía. Dicho porcentaje de daño acumulado posee un error estándar asociado (S_e) que se utiliza para corregir el porcentaje de agrietamiento calculado. El error se calcula con la expresión de la Ecuación 504-08. Para determinar el área agrietada considerando la confiabilidad, se utilizan las expresiones que se presentan en las Ecuaciones 502-08 y 504-08.

$$FC_{Top-D} = 10,56 \left(\frac{C_4}{1 + e^{(C_1 * B_1 - C_2 * B_2 * \text{Log}(D_{Top} * 100))}} \right)$$

Donde,

FC_{Top} = Longitud de grietas longitudinales que inician en la superficie de la MAC en pies/milla (ft/mi).

D_{Top} = Daño por fatiga de arriba hacia abajo, en decimal.

$C_1 = 7,00$

$C_2 = 3,50$

$$C_4 = 1000$$

Factores locales para Costa Rica:

$$B_1 = 1,3637$$

$$B_2 = 0,9881$$

$$S_{eFC_{Top-D}} = 165,68 * \text{Log}(D_{Top} * 100) + 542,53$$

Donde,

$S_{eFC_{Top-D}}$ = Error estándar agrietamiento de abajo hacia arriba por fatiga.

$S_{eFC_{Top-D}}$ = limitado a 700 ft/mi (aproximadamente 133 m/km).

$$FC_{Top-D} - P = FC_{Top-D} + S_{eFC_{Top-D}} * Z_p$$

Donde,

$FC_{Top-D} - P$ = Longitud de grietas longitudinales que inician en la superficie de la MAC en pies/milla (ft/mi), ajustado a nivel de confianza del Proyecto.

FC_{Top-D} = Longitud de grietas longitudinales que inician en la superficie de la MAC en pies/milla (ft/mi), al 50 % de confiabilidad.

$S_{eFC_{Top-D}}$ = Error estándar agrietamiento de arriba hacia abajo.

Z_p = Valor de "z" de la distribución normal estándar para el nivel de confianza definido.

Para el nivel de análisis, utilizando los umbrales establecidos para más de 25 millones de ejes equivalentes de diseño, se utilizó un 95 % de confiabilidad. En la Tabla C2-27 se muestra un resumen del daño acumulado por año y el agrietamiento longitudinal. A continuación, se presenta modo de ejemplo, la memoria de cálculo para el año 15:

- i. El primer paso consiste en la estimación de los ESAL's acumulados en el año de interés (año 15 en este caso).

$$\text{ESAL año 15} = 23\,021\,499$$

- ii. El segundo paso consiste en determinar el daño acumulado al año de interés.

$$D = \sum_{i=1}^{15} \frac{23\,021\,499}{177\,479\,899} = 13,0 \%$$

$$FC_{Top-D} = 10,56 \left(\frac{1000}{1 + e^{(7,00x1,3637 - 3,50x0,9881 x \text{Log}(0,13x100))}} \right) = 35,3 \text{ ft/mi}$$

$$S_{eFC_{Top-D}} = 165,68 * \text{Log}(0,13 * 100) + 542,53 = 726,93 \text{ ft/mi}$$

(se toma 700 ft/mi; valor máximo recomendado).

$$FC_{Top-D} - P = FC_{Top-D} + S_{eFC_{Top-D}} * Z_p$$

$$Z_{95\%} = 1,645 \text{ (recuperado de distribución normal estándar)}$$

$$FC_{Top-D} = 35,3 + 700 * 1,645 = 1186,725 \text{ ft/mi}$$

Tabla C2-27

Resultados de daño acumulado y longitud de grietas

Año	ESAL's año	ESAL's acumulado	Daño acumulado (%)	Se	FC (ft/mi)	FC confiabilidad (95 %)
1	1372046	1372046	0,8	0,5	524,010	862,433
2	1393626	2765672	1,6	1,5	574,449	946,353
3	1414740	4180413	2,4	2,7	604,175	996,512
4	1436320	5616733	3,2	4,3	625,425	1032,992
5	1457900	7074633	4,0	6,0	642,030	1062,066
6	1485942	8560575	4,8	8,0	655,748	1086,626
7	1501526	10062101	5,7	10,2	667,376	1107,953
8	1536826	11598928	6,5	12,6	677,604	1127,203
9	1551614	13150541	7,4	15,3	686,638	1144,683
10	1580121	14730663	8,3	18,1	694,802	1160,944
11	1609426	16340089	9,2	21,1	700,000	1172,537
12	1624679	17964768	10,1	24,4	700,000	1175,764
13	1660911	19625679	11,1	27,8	700,000	1179,216
14	1683423	21309102	12,0	31,5	700,000	1182,865
15	1712397	23021499	13,0	35,3	700,000	1186,725
16	1741836	24763335	14,0	39,4	700,000	1190,800
17	1764814	26528148	14,9	43,7	700,000	1195,074
18	1794719	28322867	16,0	48,2	700,000	1199,566
19	1830951	30153819	17,0	52,9	700,000	1204,294
20	1861323	32015141	18,0	57,8	700,000	1209,247

En la tabla anterior se puede observar que el daño alcanza un 18,0 % en el periodo de diseño de 20 años. La evolución del daño a través del tiempo se presenta en la Figura C2-16. En la Figura C2-17 se muestra la evolución de la longitud de grietas para el mismo lapso.

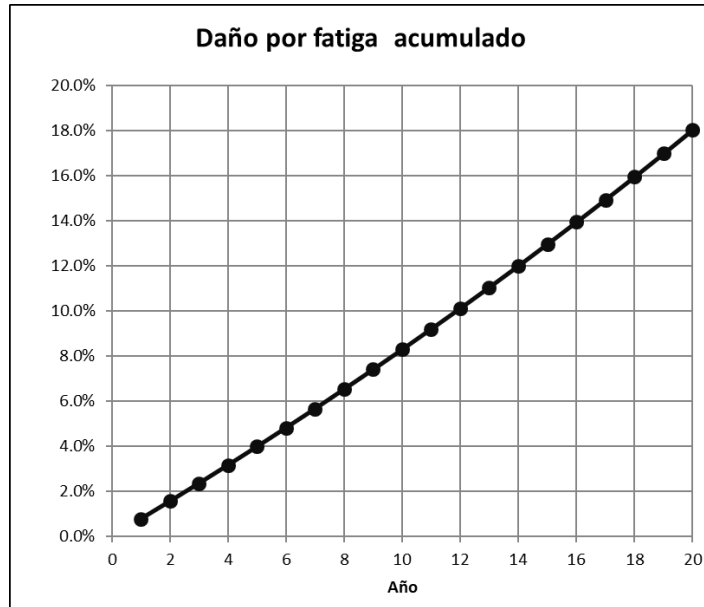


Figura C2-16

*Porcentaje de daño acumulado para la estructura original
(agrietamiento de arriba hacia abajo)*

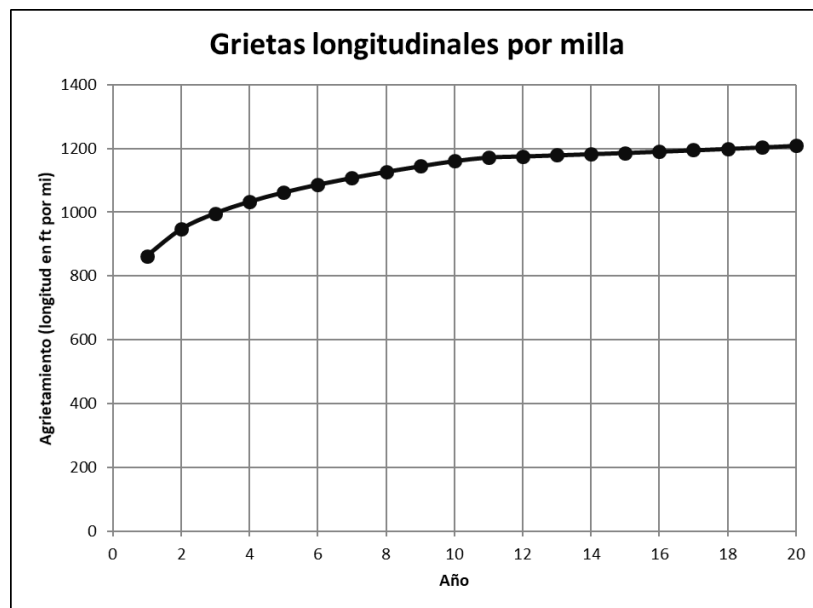


Figura C2-17

Grietas longitudinales (de arriba hacia abajo). Estructura original

Verificación de la deformación de la mezcla asfáltica

Para calcular la deformación permanente se utilizan las ecuaciones propuestas en Subsección 501.01 Ahuellamiento en la mezcla asfáltica, de la presente guía.

Procedimiento

Deformación unitaria vertical, $\varepsilon_v = 69,36 \mu s$

Temperatura promedio de la mezcla, $T = 30,79 \text{ }^\circ\text{C} = 87,4 \text{ }^\circ\text{F}$.

$$C_1 = -0,1039 * 8,661^2 + 2,4868 * 8,661 - 17,342 = -3,597$$

$$C_2 = 0,0172 * 8,661^2 - 1,7331 * 8,661 + 27,428 = 13,707$$

$$k_1 = (C_1 + C_2 * d) * 0,328196^d = (-3,597 + 13,707 * 8,661) * 0,328196^{8,661} = 0,4476$$

$$\frac{\varepsilon_p}{69,36 * 10^{-6} \text{ in/in}} = 10^{-3,35412} 87,4^{1,5606} (32\ 015\ 141)^{0,479244}$$

$$\varepsilon_p \left(\frac{\text{in}}{\text{in}} \right) = 0,130$$

$$\text{Deformación total año 20} = \varepsilon_p * k_1 = 0,130 * 0,4476 = 0,058 \text{ in} = 0,1457 \text{ cm}$$

Cada capa posee un error estándar asociado (S_e). Para la mezcla asfáltica es determinado como se indica en la Ecuación 504-02. En este ejemplo se utilizó un nivel de confianza de 95 %.

$$S_{e_{MAC}} = 0,24 * \delta_{MAC}^{0,8026} + 0,001$$

$$S_{e_{MAC}} = 0,24 * 0,058^{0,8026} + 0,001 = 0,025 \text{ in} = 0,064 \text{ cm}$$

Verificación de la deformación de las capas granulares

Para calcular la deformación permanente se utilizan las ecuaciones propuestas en la Subsección 501.02 Ahuellamiento en materiales granulares, de la presente guía.

Procedimiento para la Base

Tomando en cuenta que:

Profundidad del nivel freático (GTW): 7,75 m = 25,43 ft

$$W_c = 51,712 \left[\left(\frac{24505}{2555} \right)^{\frac{1}{0,64}} \right]^{-0,3586 * 25,43^{0,1192}} = 8,03$$

$$\log \beta = -0,61119 - 0,017638 * 8,03 = -0,753$$

$$\beta = 10^{-0,753} = 0,177$$

$$\rho = 10^9 \left[\frac{\ln \left[\frac{(0,15)}{20} \right]}{1 - (10^9)^{0,177}} \right]^{0,177} = 9254,50$$

$$\left(\frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_r} \right) = \frac{(e^{(9254,5)^{0,177}} * 0,15) + (e^{(9254,5/10^9)^{0,177}} * 20)}{2} = 22,75$$

$$\delta_a = \beta_{BG} * \left(\frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_r} \right) e^{-\left[\frac{\rho}{N} \right]^\beta} \varepsilon_v h =$$

$$2,03 * (22,75) e^{-\left[\frac{9254,5}{32015141} \right]^{0,177}} * \left(162,31 * 10^{-6} \frac{in}{in} \right) * 9,843 = 0,058 in = 0,148 cm$$

Dentro del cálculo de deformación permanente deben tomarse en cuenta la confiabilidad. Cada capa posee un error estándar asociado (S_e). Para la base granular es determinado como se indica en la Ecuación 504-03. En este ejemplo se utilizó un nivel de confianza de 95%.

$$S_{e_{Granular}} = 0,1235 * \delta_{Granular}^{0,5012} + 0,001$$

$$S_{e_{base}} = 0,1235 * 0,058^{0,5012} + 0,001 = 0,031 in = 0,079 cm$$

Procedimiento para la Subbase

$$W_c = 51,712 \left[\left(\frac{21159}{2555} \right)^{\frac{1}{0,64}} \right]^{-0,3586 * 25,43^{0,1192}} = 9,06$$

$$\log \beta = -0,61119 - 0,017638 * 9,06 = -0,771$$

$$\beta = 10^{-0,771} = 0,169$$

$$\rho = 10^9 \left[\frac{\ln \left[\frac{(0,15)}{20} \right]}{1 - (10^9)^{0,169}} \right]^{\frac{1}{0,169}} = 14\,031,90$$

$$\left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) = \frac{(e^{(14\,031,90)^{0,169}} * 0,15) + (e^{(14\,031,90/10^9)^{0,169}} * 20)}{2} = 23,25$$

$$\delta_a = \beta_{BG} * \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) e^{-\left[\frac{p}{N} \right]^\beta} \varepsilon_v h =$$

$$2,03 * (23,24) e^{-\left[\frac{14\,031,90}{32\,015\,141} \right]^{0,150}} * \left(116,56 * 10^{-6} \frac{in}{in} \right) * 13,78 = 0,058 \text{ in} = 0,147 \text{ cm}$$

Dentro del cálculo de deformación permanente debe tomarse en cuenta la confiabilidad. Cada capa posee un error estándar asociado (S_e). Para la subbase granular es determinado como se indica en la Ecuación 504-03. En este ejemplo se utilizó un nivel de confianza de 95%.

$$S_{e_{Granular}} = 0,1235 * \delta_{Granular}^{0,5012} + 0,001$$

$$S_{e_{subbase}} = 0,1235 * 0,058^{0,5012} + 0,001 = 0,031 \text{ in} = 0,079 \text{ cm}$$

Procedimiento para la Subrasante

$$W_c = 51,712 \left[\left(\frac{6828}{2555} \right)^{\frac{1}{0,64}} \right]^{-0,3586 * 25,43^{0,1192}} = 23,00$$

$$\log \beta = -0,61119 - 0,017638 * 23,00 = -1,017; \beta = 10^{-1,017} = 0,096$$

$$\rho = 10^9 \left[\frac{\ln \left[\frac{(0,15)}{20} \right]}{1 - (10^9)^{0,096}} \right]^{\frac{1}{0,096}} = 67851843,69$$

$$\left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) = \frac{(e^{(67851843,69)^{0,096}} * 0,15) + (e^{(67851843,69/10^9)^{0,096}} * 20)}{2} = 42,28$$

- Para $z=0$ in. (superficie de la subrasante)

$$\varepsilon_p = \beta_{SG} * \left(\frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_r}\right) e^{-\left[\frac{p}{N}\right]^\beta} \varepsilon_v = 1,35 * (42,28) e^{-\left[\frac{67851843,69}{32\ 015\ 141}\right]^{0,096}} * \left(161,32 * 10^{-6} \frac{in}{in}\right) = 0,0032 in$$

- Para z=6 in.

$$\varepsilon_p = \beta_{SG} * \left(\frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_r}\right) e^{-\left[\frac{p}{N}\right]^\beta} \varepsilon_v = 1,35 * (48,28) e^{-\left[\frac{67851843,69}{32\ 015\ 141}\right]^{0,096}} * \left(131,90 * 10^{-6} \frac{in}{in}\right) = 0,0026 in$$

- Total, para la subrasante

$$k = \frac{1}{6} * \ln\left(\frac{\varepsilon_{p,z=0}}{\varepsilon_{p,z=6}}\right) = \frac{1}{6} * \ln\left(\frac{0,0032 in}{0,0026 in}\right) = 0,034$$

$$\delta = \int_0^{h_{roca}} \varepsilon_p(z) dz$$

$$\delta = \varepsilon_p(z) dz \int_0^{h_{roca}} e^{-kz} dz = \left(\frac{1 - e^{-k * h_{roca}}}{k}\right) \varepsilon_{p,z=0}$$

Donde,

δ = deformación plástica total de la subrasante, in.

h_{roca} = profundidad de la roca, pies.

$$\delta = \left(\frac{1 - e^{-0,034 * 350}}{0,034}\right) * 0,0032 = 0,096 in = 0,244 cm$$

Dentro del cálculo de deformación permanente deben tomarse en la confiabilidad. Cada capa posee un error estándar asociado (Se). Para la subrasante es determinado como se indica en la Ecuación 504-04. En este ejemplo se utilizó un nivel de confianza de 95%.

$$Se_{Suelo} = 0,1477 * \delta_{Suelo}^{0,6711} + 0,001$$

$$Se_{Suelo} = 0,1477 * 0,096^{0,6711} + 0,001 = 0,032 in = 0,132 cm$$

Deformación permanente total

El ahuellamiento total para un año determinado se calcula como se indica en la Ecuación 504-01. En este caso se muestra el ahuellamiento total al año 20 para un nivel de confianza de 95 %.

$$\delta_{total} = \delta_{MAC} + \delta_{Base} + \delta_{Subbase} + \delta_{SR} + (Se_{MAC} + Se_{Base} + Se_{Subbase} + Se_{Suelo}) * Z_p$$

$$\delta_{total} = 0,058 + 0,058 + 0,058 + 0,096 + (0,025 + 0,031 + 0,031 + 0,032) * 1,645$$

$$\delta_{total} = 0,466 \text{ in} = 11,8 \text{ mm}$$

El ahuellamiento total es de 11,8 mm al final del período de diseño. Por tanto, se excede el umbral máximo permitido (10 mm), es decir que la estructura no cumple el criterio de deformación. En la Figura C2-18 se muestra la evolución del deterioro con el tiempo.

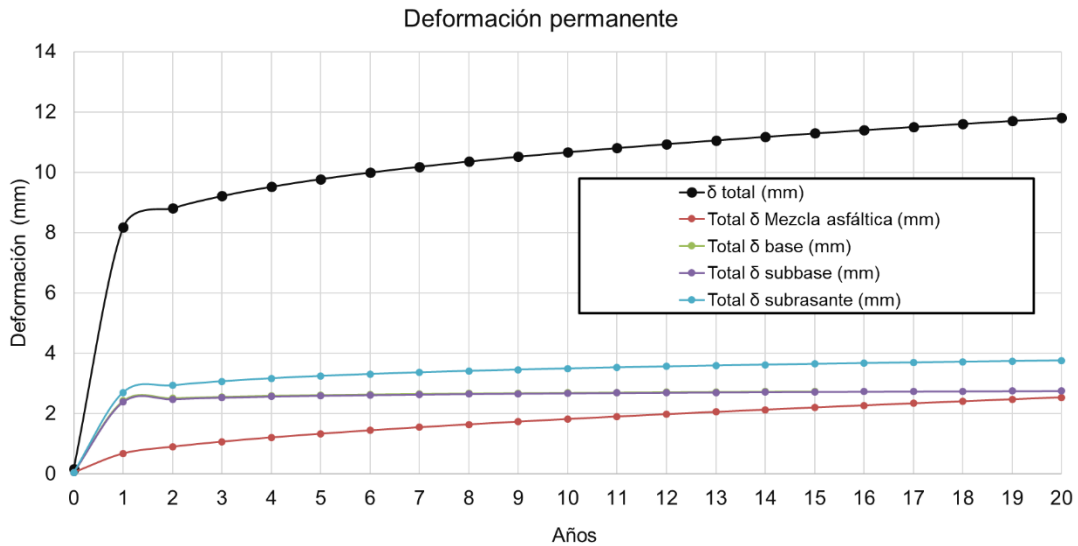


Figura C2-18

Deformación permanente en la estructura original

Observaciones

En la Tabla C2-28 se muestra un resumen de los deterioros estimados para la estructura preliminar analizada (diseñada con AASHTO 93). Los datos obtenidos indican que no se cumple con ninguno de los parámetros de desempeño, por tanto, el siguiente paso consistirá en modificar los espesores de capas y recalcular la deformación permanente total y el agrietamiento por fatiga (ambos casos). El proceso se repetirá hasta que se alcancen valores por debajo de los límites establecidos. Dado los resultados obtenidos, los pasos siguientes deberán contemplar un aumento en los espesores de todas las capas o una mejora en capacidad en alguna de ellas como por ejemplo en la base.

Tabla C2-28*Parámetros de desempeño de la estructura original*

Deterioro	Valor	Límites
Fatiga (MEPDG) (N_f admisibles) (abajo hacia arriba)	141 838 620	---
Agrietamiento (% del total del área del carril)	19,384	10 % máx.
Fatiga (MEPDG) (N_f admisibles) (arriba hacia abajo)	177 479 899	---
Agrietamiento (longitud en ft por mi)	1209,247	1 500 ft/milla (máx.)
Deformación total (mm)	11,8	10 mm (máx.)

Estructuras propuestas – Iteración 7Características generales de la estructura

La séptima alternativa de diseño que se analizará presenta las características generales descritas en la Tabla C2-29. En esta nueva propuesta el espesor de la capa de mezcla asfáltica se incrementó en 2cm con respecto a la estructura original, la base 10cm y la subbase se mantuvo. Los módulos de los materiales fueron recalculados de acuerdo con los cambios efectuados.

Tabla C2-29*Características generales de las capas de la estructura propuesta – iteración 7*

Capa	Espesor (cm)	Módulo (psi)
CA	24	666 817
Base	35	24 112
Subbase	35	21 385
Subrasante	-	6828

Resultados obtenidos

El incremento del espesor de la capa de mezcla asfáltica no causó una reducción importante en el agrietamiento por fatiga (de arriba hacia abajo). Tampoco hubo una reducción de las grietas que se propagan de abajo hacia arriba. La deformación permanente total está al límite de la tolerancia.

Tabla C2-30

Parámetros de desempeño de la estructura de iteración 7

Deterioro	Valor	Límites
Fatiga (GDP) (N _r admisibles) (abajo hacia arriba)	247 136 329	---
Agrietamiento (% del total del área del carril)	18,16	10 % máx.
Fatiga (GDP) (N _r admisibles) (arriba hacia abajo)	304 422 766	---
Agrietamiento (longitud en ft por mi)	1177,20	1 500 ft/milla (máx.)
Deformación total (mm)	10,07	10 mm (máx.)

Estructuras propuestas adicionales

Se determinó que estructuras con menos de 35 cm de mezcla asfáltica no cumplen con el criterio de área agrietada. Espesores de capas de mezcla asfáltica de esta magnitud no son técnicamente adecuados. Considerando los resultados obtenidos, el alto nivel de tráfico y la baja capacidad de carga del suelo de fundación del pavimento, se propone el uso de base estabilizada con cemento Portland.

A continuación, se presenta la memoria de cálculos para la solución propuesta. La metodología de diseño sigue los mismos pasos que en el caso anterior. Se estima una estructura preliminar con AASHTO 93, se estiman los módulos de cada capa, se calculan las respuestas estructurales y finalmente se determinan los parámetros de desempeño.

PROPUESTA DE SOLUCION CON BASE TRATADA CON CEMENTO PORTLAND

Estimación inicial con AASTHO-93

Los parámetros de diseño, a excepción de las propiedades de la base tratada con cemento, corresponden a los mismos que fueron utilizados en el diseño con base granular. A continuación, se presenta un resumen de las variables de entrada.

17. Módulo de la mezcla asumido: 450 000 psi.
18. Factor direccional: $LDF=0,6$
19. Factor por carril: Con dos carriles por sentido $DL= 0,80$.
20. Factor de crecimiento: Se utilizó 4,5% para los vehículos livianos; 2,0% para el tránsito pesado y 1,0% para los buses.
21. Ejes equivalentes de diseño
 $ESAL_{diseño} = 32\ 015\ 141$
22. Nivel de análisis: $ESAL_{diseño} = 32\ 015\ 141 > 25\ millones$, Nivel o categoría 1.
23. Estimación de los coeficientes estructurales:

- v. Subrasante. Utilizando la ecuación recomendada para suelos de grano fino, el módulo resiliente en este caso de estudio se estima como:

$$M_R = 1500 * CBR = 1500 * 5 = 7\ 500\ psi$$

El valor de CBR de la subrasante para este caso es de 5%. Este dato fue obtenido en el laboratorio a través del análisis de muestras recuperadas in situ.

- vi. Base tratada con cemento Portland. Con una resistencia a la compresión simple no confinada de 435 psi (3,0 MPa) y la Figura C2-19 Nomograma de módulo resiliente para una base estabilizada se obtiene un a_2 de 0,16.

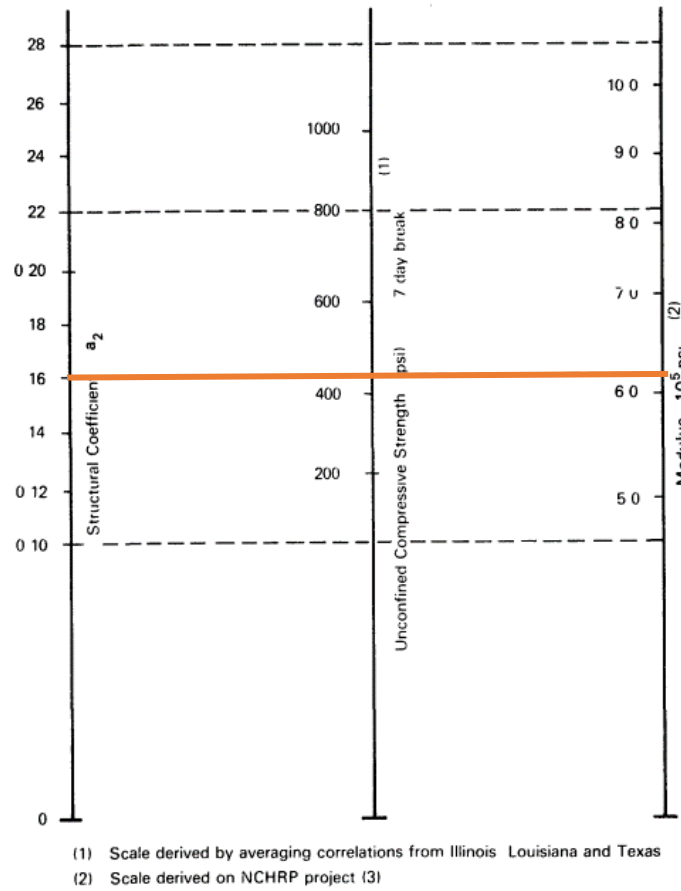


Figura C2-19

Nomograma de módulo resiliente para bases tratadas con cemento Portland

- vii. Subbase granular. Con un CBR = 30 (dato obtenido del análisis de una muestra del material propuesto) y utilizando la Figura C2-20 Nomograma de módulo resiliente para una subbase granular se obtiene un coeficiente estructural a_3 de 0,11.

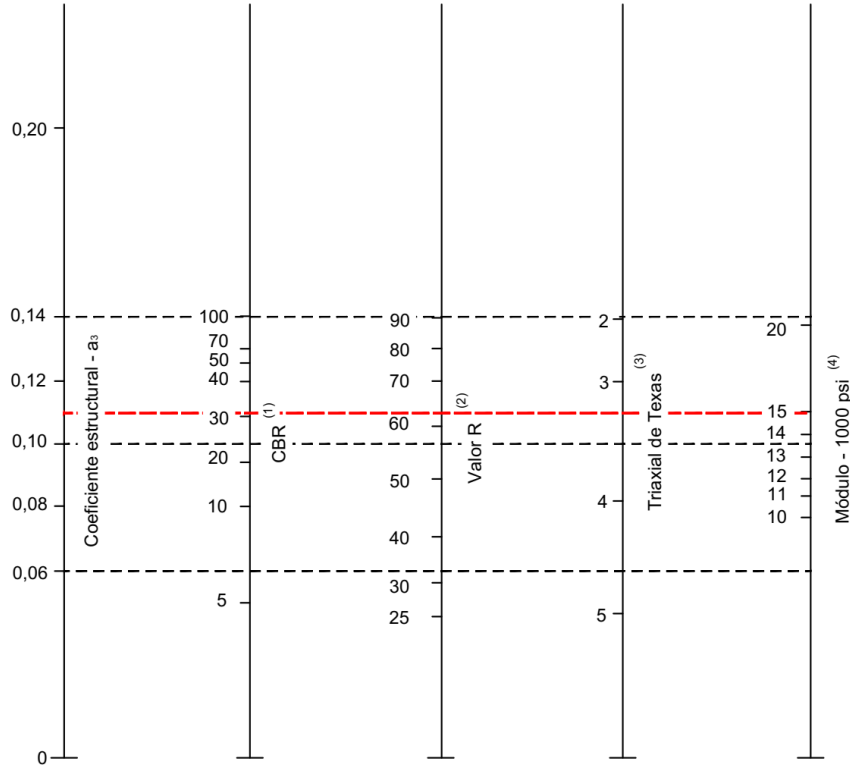


Figura C2-20

Nomograma de módulo resiliente para una subbase granular

Nota: Para este ejemplo de cálculo en específico, los valores de CBR para los materiales granulares fueron obtenidos en el laboratorio.

- viii. Carpeta asfáltica. Con un módulo de 450 000 psi y utilizando la Figura C2-21 Curva de coeficiente estructural contra módulo de la mezcla asfáltica se obtiene un coeficiente estructural a_1 de 0,45.

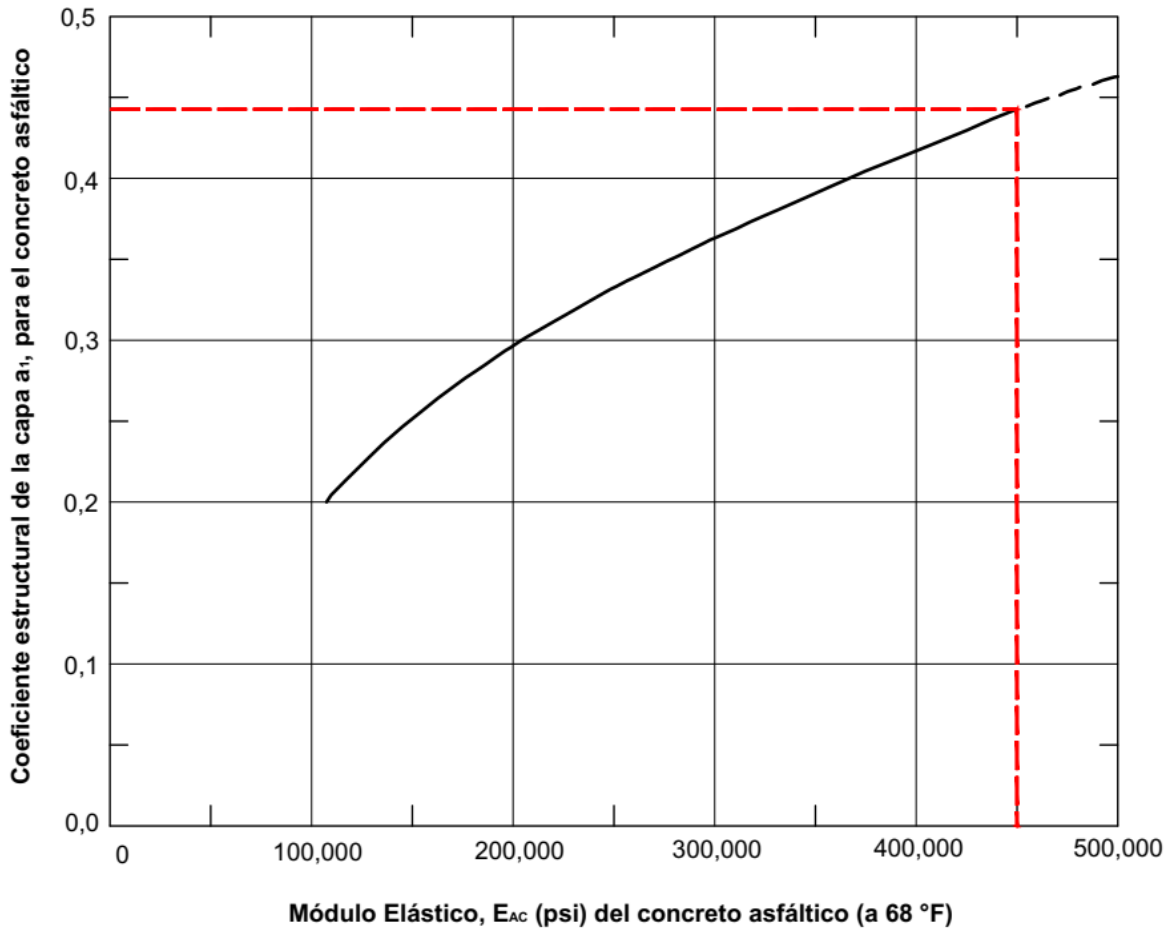


Figura C2-21

Curva de coeficiente estructural contra módulo de la mezcla asfáltica

24. Estimación de espesores

- i. Serviciabilidad inicial P_0 . 4,2, valor común para pavimento flexible.
- ii. Serviciabilidad final P_t . 2,5 por ser tránsito alto.

$$\Delta PSI = P_0 - P_t = 4,2 - 2,5 = 1,7$$

- (4) Coeficiente de corrección por drenaje. De acuerdo con los resultados del estudio hidrológico de la zona del proyecto, se determinó que existe un drenaje regular y más del 25 % del tiempo expuesto a condiciones de humedad, el valor de m es igual a 0,8 (ver Tabla 206-01 Definiciones generales de los diferentes niveles de drenaje de la estructura del pavimento, de la Sección 206 Condiciones de Drenaje de la presente guía).

- (5) Nivel de confianza. Considerando la carretera como una autopista de alto volumen, se utiliza las recomendaciones de AASHTO-93, nivel de confianza de 95 %, $Z_r = -1,645$ y $S_o = 0,45$.
- (6) SN_1 requerido sobre la base. Con una resistencia a compresión de 3,0 MPa (módulo de ruptura de 1,03 MPa o 150,2 psi), el módulo resiliente asociado según los nomogramas de AASHTO (Figura C2-19 Nomograma de módulo resiliente para una base estabilizada) es de aproximadamente 600 000 psi.

Dicho valor de módulo se utiliza como insumo, al igual que los parámetros de diseño presentados anteriormente, para determinar el número estructural que debe poseer la capa que se encuentra encima de la base. Para esto utilizamos la Ecuación 207-04 presentada en la Sección 207 Coeficientes Estructurales de la presente guía, misma que se muestra a continuación:

$$\text{Log}_{10}W_{18} = Z_r * S_o + 9,36 * \text{Log}_{10}(SN_1 + 1) - 0,20 + \frac{\text{Log}_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5}\right)}{\frac{0,40 + 1094}{(SN_1 + 1)^{5,19}}} + 2,32 * \text{Log}_{10}M_r - 8,07$$

$$\text{Log}_{10}(32\ 015\ 141) =$$

$$-1,645 * 0,45 + 9,36 * \text{Log}_{10}(SN_1 + 1) - 0,20 + \frac{\text{Log}_{10}\left(\frac{1,7}{4,2 - 1,5}\right)}{\frac{0,40 + 1094}{(SN_1 + 1)^{5,19}}} + 2,32 * \text{Log}_{10}(600\ 000) - 8,07$$

Despejando el valor de SN_1 se obtiene:

$$SN_1 = 1,154$$

- (7) SN_2 requerido sobre la subbase. Es necesario conocer el módulo resiliente de la capa, este puede obtenerse con los nomogramas de AASHTO-93 o por medio de las ecuaciones de correlación. Utilizando la Figura C2-20 Nomograma de módulo resiliente para una subbase granular se obtiene un valor de 15 000 psi. Con el módulo resiliente de la subbase, es posible calcular el SN_2 requerido sobre la subbase:

$$\text{Log}_{10}W_{18} = Z_r * S_o + 9,36 * \text{Log}_{10}(SN_1 + 1) - 0,20 + \frac{\text{Log}_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5}\right)}{\frac{0,40 + 1094}{(SN_1 + 1)^{5,19}}} + 2,32 * \text{Log}_{10}M_r - 8,07$$

$$\text{Log}_{10}(32\ 015\ 141) =$$

$$-1,645 * 0,45 + 9,36 * \text{Log}_{10}(SN_2 + 1) - 0,20 + \frac{\text{Log}_{10}\left(\frac{1,7}{4,2 - 1,5}\right)}{\frac{0,40 + 1094}{(SN_2 + 1)^{5,19}}} + 2,32 * \text{Log}_{10}(15\ 000) - 8,07$$

Despejando SN_2 se obtiene el siguiente valor:

$$SN_2 = 4,91$$

- (8) SN_3 requerido sobre la subrasante. Para determinar el valor del número estructural de las capas que se colocan sobre la subrasante, se utilizan las mismas ecuaciones que las utilizadas para determinar el valor de SN_7 y SN_2 , sin embargo, en este caso se utiliza el módulo de la subrasante:

$$\text{Log}_{10}W_{18} = Z_r * S_o + 9,36 * \text{Log}_{10}(SN_1 + 1) - 0,20 + \frac{\text{Log}_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5}\right)}{\frac{0,40 + 1094}{(SN_1 + 1)^{5,19}}} + 2,32 * \text{Log}_{10}M_r - 8,07$$

$$\text{Log}_{10}(32\ 015\ 141) =$$

$$-1,645 * 0,45 + 9,36 * \text{Log}_{10}(SN_2 + 1) - 0,20 + \frac{\text{Log}_{10}\left(\frac{1,7}{4,2 - 1,5}\right)}{\frac{0,40 + 1094}{(SN_2 + 1)^{5,19}}} + 2,32 * \text{Log}_{10}(7\ 500) - 8,07$$

Despejando SN_3 se obtiene:

$$SN_3 = 6,123$$

- (9) Cálculo de Espesores. Para determinar los espesores se sigue el procedimiento descrito en la guía AASHTO-93:

$$D_1^* \geq \frac{SN_1}{a_1} = \frac{1,154}{0,45} = 2,57 \text{ pulg} = 6,52 \text{ cm}$$

El valor obtenido no cumple con el espesor mínimo para el nivel del tráfico de diseño (10 cm). Por tanto, después de realizar algunas iteraciones para contener el espesor de BE menor a 35 cm, se determinó un valor de $D_1^* = 6,3$ pulgadas (16,0 cm).

$$SN_1^* = \frac{16}{2,54} * 0,45 = 2,835 \geq SN_1 \text{ Cumple}$$

Seguidamente se calcula el espesor requerido de la base:

$$D_2^* \geq \frac{4,910 - 2,835}{0,16} = 12,97 \text{ pulg} = 32,95 \text{ cm} \approx 33,0 \text{ cm}$$

$$SN_2^* = D_2^* (\text{pulg}) * a_2 = \frac{33 \text{ cm}}{2,54} * 0,16 = 2,079$$

$$SN_1^* + SN_2^* \geq SN_2$$

$$2,835 + 2,079 = 4,914 \geq 4,910 \text{ Cumple}$$

(10) Espesor de la capa de subbase.

$$D_3^* \geq \frac{SN_3 - (SN_1^* + SN_2^*)}{a_3 m_3}$$

$$D_3^* \geq \frac{6,123 - (2,835 + 2,079)}{0,11 * 0,8} = 13,75 \text{ pulg} = 34,91 \text{ cm} \approx 35 \text{ cm}$$

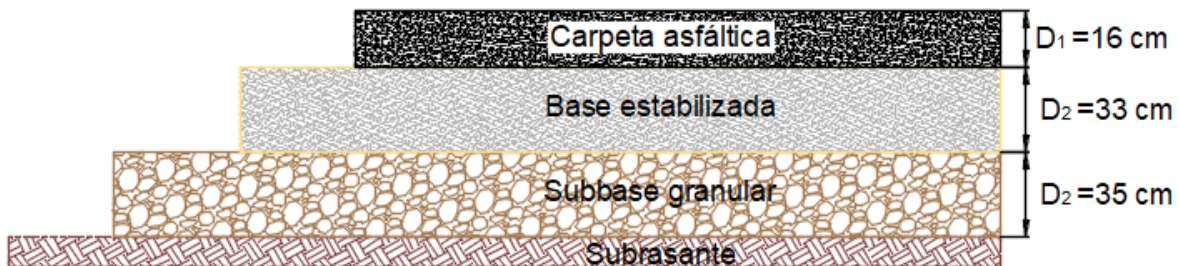


Figura C2-22

Esquema de espesores obtenidos con AASHTO-93 en el ejemplo 1

25. Estimación de las propiedades mecánicas

i. Mezcla asfáltica

Con la temperatura promedio del aire, para cada mes del año, se debe calcular la temperatura del pavimento. Para esto se utilizarán los modelos presentados en la Subsección 304.02 Ajuste por Temperatura del Módulo de la Mezcla Asfáltica del presente documento (ecuaciones del SHRP, LTPP, Instituto del Asfalto y Witczak).

Modelo SHRP:

$$T_{sup} = T_{aire} - 0,00618 * Lat^2 + 0,2289 * Lat + 24,4$$

$$T_{pav} = T_{sup} (1 - 0,063 * d + 0,007 * d^2 - 0,0004 * d^3)$$

Donde:

T_{pav} = Temperatura del pavimento en °F.

T_{sup} = Temperatura superficial del pavimento en °F.

Lat = Latitud de la zona en grados decimales.

d = Profundidad en la mezcla asfáltica en pulgadas.

Modelo LTPP:

$$T_{MAC} = 54,32 + 0,78 * T_{aire} - 0,0025 * Lat^2 - 15,14 * \log_{10}(h + 25)$$

Donde:

T_{MAC} = Temperatura del pavimento en °C.

T_{aire} = Temperatura promedio del aire en °C.

Lat = Latitud de la zona en grados decimales.

h = Profundidad en la mezcla asfáltica en mm.

Modelo Instituto del asfalto (IA):

$$T_{pav} = (T_{aire} * 1,8 + 32) \left[1 + \frac{1}{(d + 4)} \right] - \frac{34}{(d + 4)} + 6$$

Donde:

T_{pav} = Temperatura del pavimento en °F.

T_{aire} = Temperatura promedio del aire en °F.

d = Profundidad en la mezcla asfáltica en pulgadas.

Modelo de Witczak, 1992:

$$T_{eff} = 58,0 - 5,5(z) + 0,92(MAAT)$$

Donde:

T_{eff} = Temperatura del pavimento en °F.

z = Profundidad en la mezcla asfáltica en pulgadas.

$MAAT$: Temperatura media anual del aire en °F.

A continuación, se presenta el cálculo de la temperatura del pavimento para el mes de enero. Los resultados completos se resumen en la Tabla C2-31. Para efectos de estimación del módulo de la mezcla bituminosa, se usa el promedio obtenido por los cuatro modelos. Estos datos se presentan en la Tabla C2-32.

Modelo SHRP (mes de enero):

$$Temp_{sup} = 64,6 - 0,00618 * 9,83^2 + 0,2289 * 9,83 + 24,4 = 90,6^{\circ}F$$

$$T_{pav} = 90,6 * \left(1 - 0,063 * \frac{6,299}{2} + 0,007 * \frac{6,299^2}{2} - 0,0004 * \frac{6,299^3}{2} \right)$$

$$T_{pav} = 77,8^{\circ}F = 25,5^{\circ}C$$

Modelo LTPP (mes de enero):

$$T_{MAC} = 54,32 + 0,78 * 18,1 - 0,0025 * 9,83^2 - 15,14 * \log_{10}\left(\left(\frac{6,299 * 25,4}{2} + 25\right)\right)$$

$$T_{MAC} = 37,6^{\circ}C = 99,7^{\circ}F$$

Modelo Instituto del asfalto (IA) (mes de enero):

$$T_{pav} = (18,1 * 1,8 + 32) \left[1 + \frac{1}{\left(\frac{6,299}{2} + 4\right)} \right] - \frac{34}{\left(\frac{6,299}{2} + 4\right)} + 6$$

$$T_{MAC} = 74,9^{\circ}F = 23,8^{\circ}C$$

Modelo de Witczak, 1992 (mes de enero):

$$T_{eff} = 58,0 - 5,5 \left(\frac{6,299}{2}\right) + 0,92(64,6)$$

$$T_{MAC} = 100,1^{\circ}F = 37,8^{\circ}C$$

Tabla C2-31

Resumen de datos de temperatura en el pavimento por mes para los diferentes modelos

Mes	SHRP	LTPP	IA	Witczak	SHRP	LTPP	IA	Witczak
---	(°F)	(°F)	(°F)	(°F)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
Enero	77,8	99,7	74,9	100,1	25,5	37,6	23,8	37,8
Febrero	78,3	100,1	75,5	100,6	25,7	37,8	24,2	38,1
Marzo	79,2	100,9	76,7	101,6	26,2	38,3	24,8	38,7
Abril	80,6	102,2	78,6	103,1	27,0	39,0	25,9	39,5
Mayo	81,7	103,2	80,0	104,2	27,6	39,5	26,7	40,1
Junio	81,7	103,2	80,0	104,2	27,6	39,5	26,7	40,1
Julio	80,9	102,5	79,0	103,4	27,2	39,2	26,1	39,7
Agosto	81,2	102,8	79,4	103,7	27,3	39,3	26,3	39,9
Septiembre	81,7	103,2	80,0	104,2	27,6	39,5	26,7	40,1
Octubre	81,4	102,9	79,6	103,9	27,4	39,4	26,4	39,9
Noviembre	79,8	101,5	77,5	102,2	26,6	38,6	25,3	39,0
Diciembre	78,6	100,4	75,9	100,9	25,9	38,0	24,4	38,3

Tabla C2-32

Temperatura promedio mensual del pavimento según la tabla anterior

Mes	Temperatura media (°F)	Temperatura media (°C)
---	(°F)	(°C)
Enero	88,1	31,2
Febrero	88,6	31,4
Marzo	89,6	32,0
Abril	91,1	32,8
Mayo	92,3	33,5
Junio	92,3	33,5
Julio	91,4	33,0
Agosto	91,8	33,2
Septiembre	92,3	33,5
Octubre	91,9	33,3
Noviembre	90,3	32,4
Diciembre	88,9	31,6

El módulo de la mezcla asfáltica, para cada mes del año, se estimó utilizando el software Pitra ImoDin del LanammeUCR. En las figuras C2-24, C2-25, C2-26, C2-27, C2-28 y C2-29 se muestran las salidas para cada caso y en la tabla C2-33 se presenta un resumen del valor de E para cada mes. La frecuencia utilizada se determinó con la siguiente ecuación, para una velocidad de diseño de 50 km/h para vehículos pesados.

$$\text{Log}(t) = -0.95 * \text{Log}(v) + 0.0207 * h - 0.087; F = 1/t$$

Donde, "h" es el espesor medio de la capa y "v" es la velocidad en millas por hora.

$$\text{Log}(t) = -0.95 * \text{Log}(31,3) + 0.0207 * 3,15 - 0.087 = 0,0356 \text{ s}$$

$$F = 1/0,0356 \text{ Hz}$$

$$F = 28,11 \text{ Hz}$$

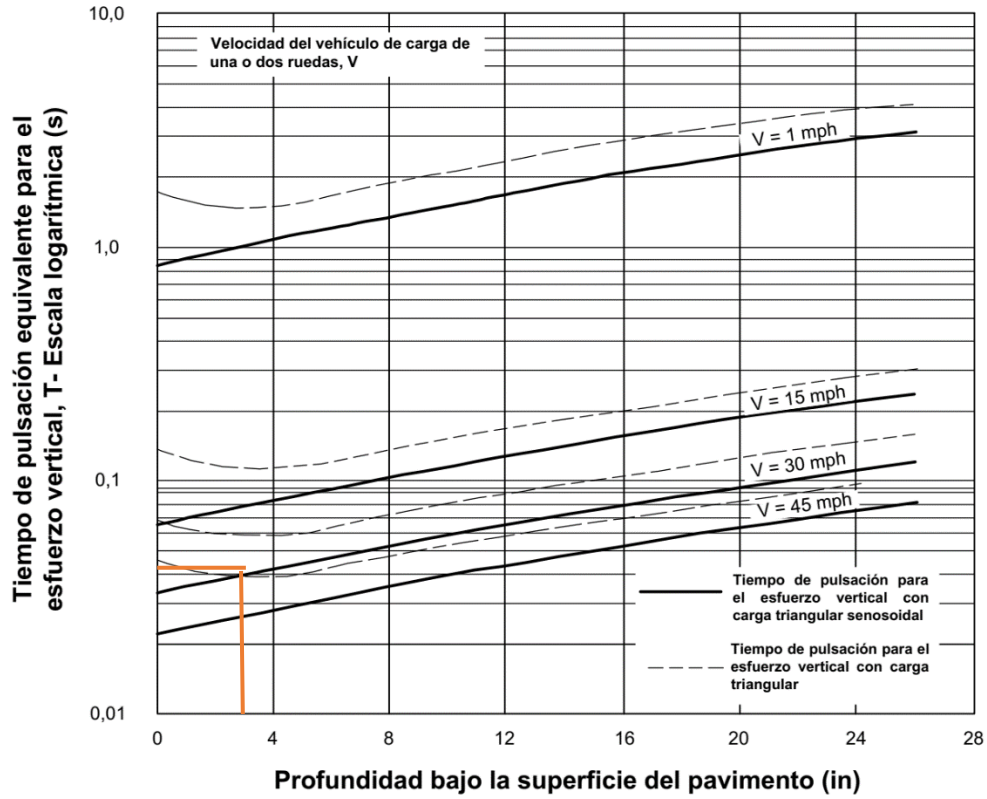


Figura C2-23

Tiempo de pulsación equivalente del esfuerzo vertical según la velocidad del vehículo y la profundidad (Gráfico de Barksdale).

Adaptado de National Cooperative Highway Research Program, 2004.

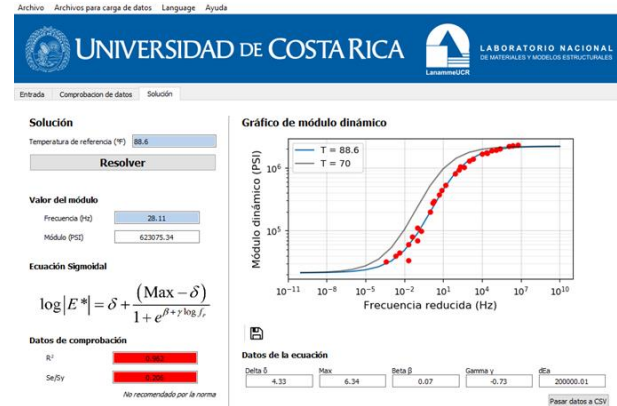
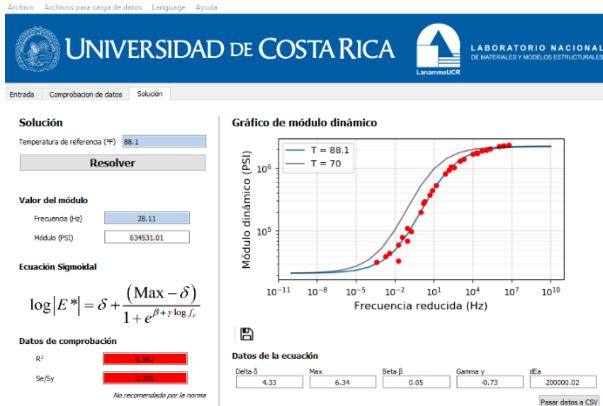


Figura C2-24

Módulo resiliente para enero y febrero

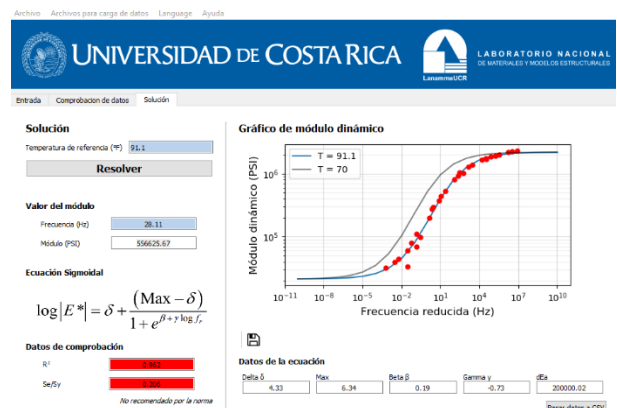
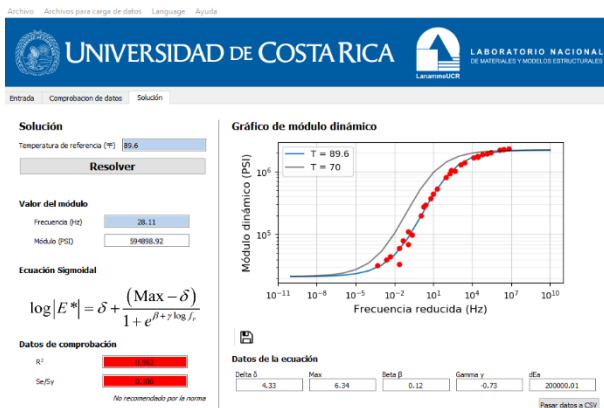


Figura C2-25

Módulo resiliente para marzo y abril

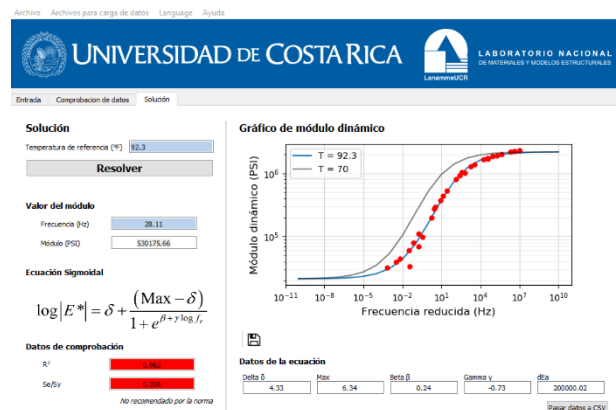
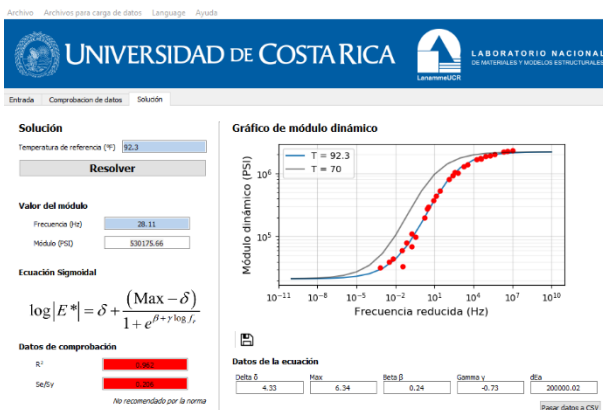


Figura C2-26

Módulo resiliente para mayo y junio

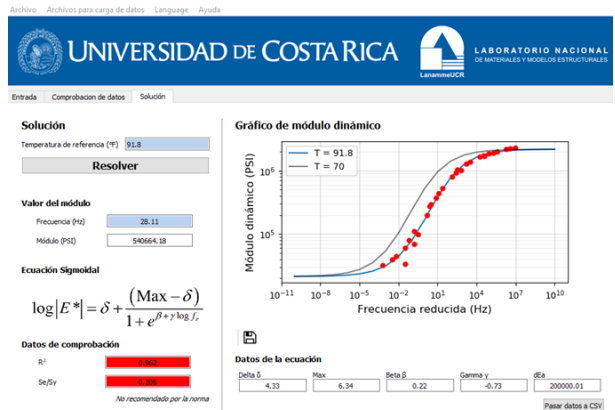
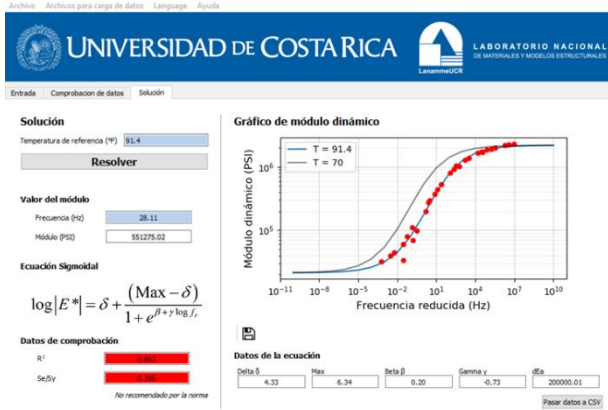


Figura C2-27

Módulo resiliente para julio y agosto

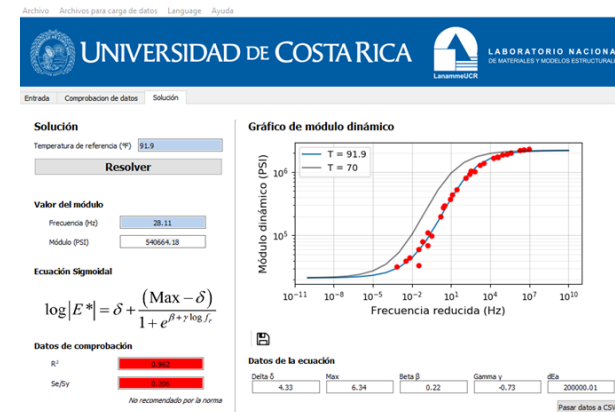
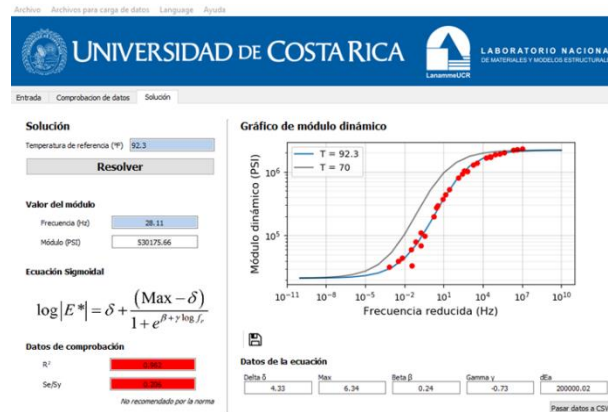


Figura C2-28

Módulo resiliente para setiembre y octubre

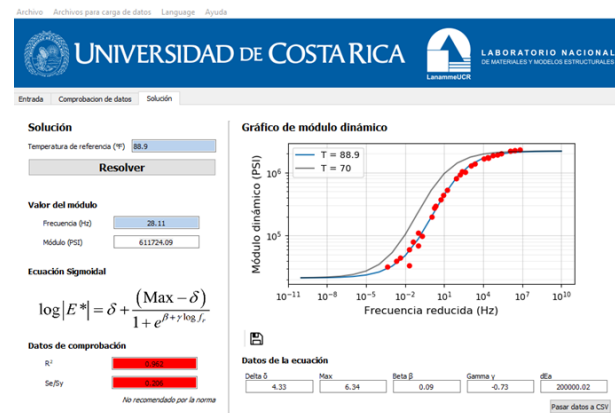
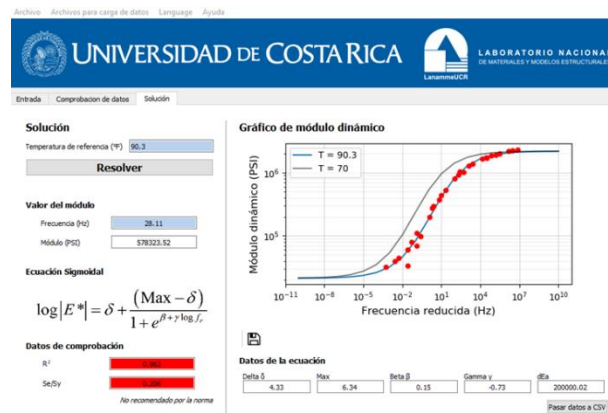


Figura C2-29

Módulo resiliente para noviembre y diciembre

Tabla C2-33

Resumen de módulos de la mezcla asfáltica para cada mes del año

Mes	Módulo de la carpeta asfáltica
---	(psi)
Enero	634531
Febrero	623075
Marzo	594899
Abril	556626
Mayo	530176
Junio	530176
Julio	551275
Agosto	540664
Septiembre	530176
Octubre	540664
Noviembre	578324
Diciembre	611724
Promedio	568526

Módulo resiliente de la subrasante corregido por condiciones ambientales. Este valor corresponde al M_R determinado en el diseño, pero afectado por un factor de reducción ambiental "FU". El valor de reducción depende de la precipitación de la zona (ver Tabla C2-12), saturación máxima del suelo (en este caso y según estudios previos se utilizó un valor de 180mm para el suelo MH de la subrasante de este proyecto (Arias, 2020)), índice de plasticidad y material menor a 75 μm . En este caso el valor de FU obtenido, según sección 303 y datos climáticos del proyecto es de 0,91 (ver Tablas C2-12 y C2-13).

$$M_{RSG \text{ corregida}} = 0,91 * 7\,500 = 6828 \text{ psi}$$

26. Estimación de los módulos de la subbase granular. Para el análisis estructural del pavimento se utiliza software de multicapa elástica. En este nivel de análisis, los módulos de los materiales granulares son corregidos de acuerdo con el estado de esfuerzo de cada capa (mitad de la capa). El método consiste en un proceso cíclico que sigue las siguientes etapas:

- i. Proponer un valor inicial de E (el primer valor corresponde al usado en AASHTO 93). El módulo de la base estabilizada se mantiene constante (600 000 psi).
- ii. Determinar los esfuerzos principales a la mitad de la subbase.

- iii. Calcular el invariante de esfuerzos (suma de esfuerzos principales más el aporte del peso del material si es requerido)
- iv. Calcular el nuevo valor de E para cada caso (en base a un modelo)
- v. Estimar el error admisible, en término porcentual, entre el módulo inicial y el nuevo valor. El proceso se repite hasta que la diferencia no es mayor a 10%. En todos los cálculos se mantienen constantes los valores de E de la mezcla bituminosa y suelo de subrasante. Estos valores son los módulos corregidos por temperatura y humedad respectivamente.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la estimación de los módulos de los materiales granulares. En la Tabla C2-35 se presentan los puntos donde obtuvieron los esfuerzos principales. Y en la Tabla C2-36 se presentan las iteraciones efectuadas hasta la convergencia de los resultados. La estructura modelada (resultado del diseño preliminar AASHTO 93) para estimar las respuestas se detalla en la siguiente figura:

Tabla C2-34

Estructura de pavimento preliminar (con base estabilizada con cemento)

	Poisson	Espesor	Espesor	Módulo
	---	in	cm	psi
Mezcla asfáltica	0,35	6,299	16	568 526
Base estabilizada con cemento Portland	0,15	12,992	33	600 000
Subbase granular	0,40	13,780	35	(1)
Subrasante	0,45			6828

Nota: (1) Módulo semilla, variable para cada iteración

Tabla C2-35

Puntos donde se estimaron los esfuerzos principales para un eje simple

Punto	x Coord.	y Coord.	z Coord.	Descripción
---	in	in	in	---
1	5,352	5,352	0,001	Capa superior de CA
2	5,352	5,352	3,150	Mitad de capa de CA
3	5,352	5,352	6,298	Fibra inferior de CA
4	5,352	5,352	12,795	Mitad de la base
5	5,352	5,352	26,181	Mitad de la subbase
6	5,352	5,352	33,072	Sobre la subrasante
7	5,352	5,352	39,071	6 in debajo de SG

El módulo de la subbase se estimó con tres modelos de predicción. Estos fueron calibrados para los materiales específicos propuestos para este ejemplo de diseño. A continuación, se describen las expresiones usadas:

Módulo de la subbase (modelo 1):

$$M_r = 1633,5 * P_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{0,316} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{-0.029}$$

P_a es la presión atmosférica. El invariante de esfuerzos θ corresponde a la sumatoria de los esfuerzos principales. En este caso se incluye el efecto del peso propio del material. La expresión utilizada es la siguiente:

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \frac{\gamma * z * 9.11 * (1 + 2 * k_0)}{1000}$$

$$\tau_{OCT} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} \text{ (Kpa)}$$

Donde, σ_1 , σ_2 y σ_3 son los esfuerzos principales en Kpa (calculados con 3D move, para el caso de una llanta simple de 9000 lb y una presión de contacto de 100 psi), γ es la densidad del material en kg/m^3 , z en la profundidad al centro de la capa en metros y k_0 es el coeficiente presión en reposo.

Módulo de la subbase (modelo 2):

$$M_r = 65870,3 * \theta^{0,213}$$

Módulo de la subbase (modelo 3):

$$M_r = 36154,1 * \theta^{0,308}$$

Primera iteración para corrección de módulos resilientes

Los esfuerzos principales, calculados al centro de la subbase, para la estructura resultante de AASHTO 93 son los siguientes:

Al centro de la subbase:

$$\sigma_1 = 6.07 \text{ kpa}; \sigma_2 = -2,82 \text{ kpa} \text{ y } \sigma_3 = -2,84 \text{ kpa}$$

Para efectos de cálculos, los valores que se utilizan corresponden al valor absoluto para cada caso de esfuerzo. A continuación, se muestra cálculo para primera iteración.

Módulo de la subbase (modelo 1):

$$\theta = 6,07 + 2,82 + 2,84 + \frac{2000 * 0,66 * 9,11 * (1 + 2 * 1,5)}{1000}$$

$$\theta = 60,19 \text{ kpa}$$

$$\tau_{OCT} = \frac{1}{3} \sqrt{(6,07 - 2,82)^2 + (2,82 - 2,84)^2 + (6,07 - 2,84)^2}$$

$$\tau_{OCT} = 1,53 \text{ kpa}$$

$$M_r = 1633,5 * 88,38 * \left(\frac{60,19}{88,38}\right)^{0,316} \left(\frac{1,53}{88,38} + 1\right)^{-0,029}$$

$$M_r = 127\ 801 \text{ kpa} = 18\ 536 \text{ psi}$$

Módulo de la subbase (modelo 2):

$$M_r = 65870 * 60,19^{0,308}$$

$$M_r = 157\ 661 \text{ kpa} = 22\ 867 \text{ psi}$$

Módulo de la subbase (modelo 3):

$$M_r = 36154,1 * 60,19^{0,308}$$

$$M_r = 127\ 716 \text{ kpa} = 18\ 524 \text{ psi}$$

Tabla C2-36

Primera iteración en el proceso de estimación de módulos de las capas granulares

Punto	σ_1	σ_2	σ_3	θ	T_{OCT}	E Modelo 1	E Modelo 2	E Modelo 3	E Inicial	E Promedio	error
---	(Kpa)	(Kpa)	(Kpa)	(Kpa)	(Kpa)	(psi)	(psi)	(psi)	(psi)	(psi)	%
5	6,07	-2,82	-2,84	60,19	1,53	18,536	22,867	18,524	20005	19975	0,1

El módulo inicial de la subbase fue aproximado en modelación anterior, por tal razón, el módulo final convergió en la primera iteración.

27. Análisis estructural. Consiste en estimar las respuestas críticas de la estructura. En el caso de la capa asfáltica se utiliza el módulo de la mezcla asfáltica corregido por temperatura (568 526 psi, calculado previamente, ver tabla C2-33). Los módulos de base y subbase corresponden a 600 000 psi y 19 975 psi respectivamente, en el caso del E de la subbase, su valor procede del proceso de iteración. Para seleccionar los puntos de medición de las respuestas mecánicas, en el software de análisis, se toman en cuenta los puntos recomendados para un eje simple dual.

Se determinaron las respuestas estructurales en 45 puntos (8 profundidades). Los primeros 20 se distribuyeron sobre la capa bituminosa, al centro y en la fibra inferior de esta. En el caso de la base y subbase, las mediciones se efectuaron a la mitad de la capa. Como se trata de una estructura semirrígida, también se estimaron las respuestas en la fibra inferior de la base estabilizada, para posterior verificación a fatiga. Finalmente, se analizó sobre la subrasante y 6 pulgadas (152 mm) por debajo de esta. Las profundidades (coordenada z) de los puntos de análisis se presentó en la sección anterior (Tabla C2-35).

28. Resultados. A continuación, se muestran los resultados del análisis con software de multicapa elástica, sin desviación lateral. En color se resaltan las deformaciones críticas, que posteriormente se usaran para determinar el desempeño de la estructura. (ver tablas C2-37, C2-38, C2-39, C2-40, C2-41, C2-42, C2-43 y C2-44).

Tabla C2-37

Deformaciones obtenidas del análisis estructural (Fibra superior de mezcla asfáltica)

---	Coordenadas			Deformación unitaria normal x-x	Deformación unitaria normal y-y	Deformación unitaria normal z-z	Punto de acuerdo Figura C2-12
	x	y	z	(Micro-Strain)	(Micro-Strain)	(Micro-Strain)	---
1	3,785	11,070	0,001	38,407	1,575	-21,291	---
2	3,785	12,820	0,001	41,586	-1,828	-20,884	---
3	3,785	14,570	0,001	57,187	0,444	-1,366	---
4	3,785	18,355	0,001	56,431	49,729	52,400	---
5	3,785	22,140	0,001	55,520	30,041	34,841	---

	Coordenadas			Deformación unitaria normal x-x	Deformación unitaria normal y-y	Deformación unitaria normal z-z	Punto de acuerdo Figura C2-12
	x	y	z				
6	3,785	26,140	0,001	27,512	3,859	-16,946	---
7	3,785	30,140	0,001	21,460	6,341	-14,947	---
8	3,785	38,140	0,001	16,142	2,974	-10,298	---
9	3,785	46,140	0,001	12,722	-0,499	-6,579	---
10	3,785	54,140	0,001	10,155	-2,892	-3,913	X10

Tabla C2-38

Deformaciones obtenidas del análisis estructural (Fibra intermedia de mezcla asfáltica)

	Coordenadas			Deformación unitaria normal x-x	Deformación unitaria normal y-y	Deformación unitaria normal z-z	Punto de acuerdo Figura C2-12
	x	y	z	(Micro-Strain)	(Micro-Strain)	(Micro-Strain)	
---	x	y	z	(Micro-Strain)	(Micro-Strain)	(Micro-Strain)	---
1	3,785	11,070	3,150	4,175	39,157	-16,392	---
2	3,785	12,820	3,150	1,114	37,227	-7,748	---
3	3,785	14,570	3,150	-7,473	20,104	29,904	---
4	3,785	18,355	3,150	-17,952	-18,755	100,890	X4
5	3,785	22,140	3,150	-9,038	9,044	42,105	---

Tabla C2-39

Deformaciones obtenidas del análisis estructural (Fibra inferior de mezcla asfáltica)

	Coordenadas			Deformación unitaria normal x-x	Deformación unitaria normal y-y	Deformación unitaria normal z-z	Punto de acuerdo Figura C2-12
	x	y	z	(Micro-Strain)	(Micro-Strain)	(Micro-Strain)	
1		11,070	6,298	-3,453	17,193	6,336	---
2	3,785	12,820	6,298	-4,278	14,633	11,122	---
3	3,785	14,570	6,298	-6,460	7,124	24,660	---
4	3,785	18,355	6,298	-9,943	-8,047	49,754	X4
5	3,785	22,140	6,298	-5,681	1,250	27,905	---

Tabla C2-40*Deformaciones obtenidas del análisis estructural (Centro de la base)*

	Coordenadas			Deformación unitaria normal x-x	Deformación unitaria normal y-y	Deformación unitaria normal z-z	Punto de acuerdo Figura C2-12
	x	y	z	(Micro-Strain)	(Micro-Strain)	(Micro-Strain)	---
1	3,785	11,070	12,795	-13,452	-7,823	14,330	---
2	3,785	12,820	12,795	-13,459	-8,079	14,694	---
3	3,785	14,570	12,795	-13,455	-8,746	15,638	---
4	3,785	18,355	12,795	-13,067	-9,678	16,847	X4
5	3,785	22,140	12,795	-11,760	-7,660	13,553	---

Tabla C2-41*Deformaciones obtenidas del análisis estructural (Centro de la subbase)*

	Coordenadas			Deformación unitaria normal x-x	Deformación unitaria normal y-y	Deformación unitaria normal z-z	Punto de acuerdo Figura C2-12
	x	y	z	(Micro-Strain)	(Micro-Strain)	(Micro-Strain)	---
1	3,785	11,070	26,181	-26,796	-24,188	53,143	X1
2	3,785	12,820	26,181	-26,748	-24,088	53,002	---
3	3,785	14,570	26,181	-26,598	-23,770	52,550	---
4	3,785	18,355	26,181	-25,930	-22,320	50,510	---
5	3,785	22,140	26,181	-24,842	-19,891	47,115	---

Tabla C2-42*Deformaciones obtenidas del análisis estructural (fibra superior de la subrasante)*

	Coordenadas			Deformación unitaria normal x-x	Deformación unitaria normal y-y	Deformación unitaria normal z-z	Punto de acuerdo Figura C2-12
	x	y	z	(Micro-Strain)	(Micro-Strain)	(Micro-Strain)	---
1	3,785	11,070	33,072	-29,891	-27,862	70,797	X1
2	3,785	12,820	33,072	-29,850	-27,756	70,642	---
3	3,785	14,570	33,072	-29,718	-27,422	70,152	---
4	3,785	18,355	33,072	-29,137	-25,950	67,993	---
5	3,785	22,140	33,072	-28,191	-23,576	64,496	---

Tabla C2-43

Deformaciones obtenidas del análisis estructural (6" por debajo de la subrasante)

---	Coordenadas			Deformación unitaria normal x-x	Deformación unitaria normal y-y	Deformación unitaria normal z-z	Punto de acuerdo Figura C2-12
	x	y	z	(Micro-Strain)	(Micro-Strain)	(Micro-Strain)	---
1	3,785	11,070	39,071	-24,255	-23,049	59,175	X1
2	3,785	12,820	39,071	-24,229	-22,977	59,073	---
3	3,785	14,570	39,071	-24,149	-22,751	58,750	---
4	3,785	18,355	39,071	-23,792	-21,758	57,326	---
5	3,785	22,140	39,071	-23,206	-20,147	55,007	---

Tabla C2-44

Esfuerzos obtenidos en la fibra inferior de la base estabilizada

---	Coordenadas			Esfuerzos normales x-x	Esfuerzos normales y-y	Esfuerzos normales z-z	Punto de acuerdo Figura C2-12
	x	y	z	(psi)	(psi)	(psi)	---
1	3,785	11,070	19,290	-22,856	-19,175	1,244	X1
2	3,785	12,820	19,290	-22,797	-19,132	1,241	---
3	3,785	14,570	19,290	-22,604	-18,968	1,232	---
4	3,785	18,355	19,290	-21,643	-17,822	1,180	---
5	3,785	22,140	19,290	-19,878	-15,158	1,074	---

29. Verificación del agrietamiento por fatiga (abajo hacia arriba)

Según el modelo AASHTOWare calibrado para Costa Rica:

$$M = 4,84 \left[\frac{11,33}{4 + 11,33} - 0,69 \right] = 0,237$$

$$C = 10^{0,297} = 1,728$$

Para agrietamiento de abajo-arriba:

$$k'_1 = \frac{1}{0,000398 + \frac{0,003602}{1 + e^{(11,02 - 3,49 * 6,299)}}} = 250,00$$

$$N_f = 0,007566 * C * k'_1 * b_{f1} \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{(3,9492 * b_{f2})} \left(\frac{1}{E^*}\right)^{(1,281 * b_{f3})}$$

Donde los parámetros b_{f1} , b_{f2} y b_{f3} son factores de calibración locales para Costa Rica, que en este caso tienen valores de: $b_{f1} = 0,9739$, $b_{f2} = 0,9948$ y $b_{f3} = 1,0907$ Sustituyendo en la ecuación anterior:

$$\begin{aligned} N_f &= 0,007566 * 1,728 * 250,00 * 0,9739 * \left(\frac{1}{9,94 * 10^{-6}}\right)^{(3,9492 * 0,9948)} \left(\frac{1}{568\,526\,psi}\right)^{(1,281 * 1,0907)} \\ &= 1\,304\,281\,886\,621 \end{aligned}$$

En este caso, las cargas admisibles para que la estructura falle por fatiga son mayores que los ESALs de diseño, este valor servirá de insumo para calcular el porcentaje de área agrietada a lo largo de la vida de diseño de la estructura de pavimento. Es importante tener en cuenta que la estructura debe cumplir con los criterios de área agrietada (mostrados en la Subsección 102.04 Criterios de desempeño y Niveles de Confiabilidad).

Daño acumulado y porcentaje de agrietamiento

El cálculo del daño se realiza con base en la teoría de Miner, por lo tanto, se utiliza la Ecuación 402-06 mostrada en la Sección 402 Daño Acumulado y Desviación Lateral de esta guía. Considerando la confiabilidad asociada dicho porcentaje de daño acumulado posee un error estándar asociado (S_e) que se utiliza para corregir el porcentaje de agrietamiento calculado. El error se calcula con la expresión de la Ecuación 504-05. Para determinar el área agrietada considerando la confiabilidad, se utilizan las expresiones que se presentan en las Ecuaciones 502-07 y 504-06.

$$D = \sum_{i=1}^T \frac{n_i}{N_{fi}} \quad (\text{Ec. 402-06})$$

Donde,

D = Daño.

T = Total de períodos.

n_i = Tránsito real en el período i .

N_{fi} = Tránsito permitido bajo las condiciones de servicio en el período i .

$$FC_{B-U} = \left(\frac{6000}{1 + e^{(C_1 * C'_1 + C_2 * C''_2 * \log(D_B * 100))}} \right) * \left(\frac{1}{60} \right) \quad (\text{Ec. 502-07})$$

Donde,

FC_{B-U} = Agrietamiento de abajo hacia arriba por fatiga, porcentaje por área de carril en porcentaje.

D_B = Daño por fatiga de abajo hacia arriba, en decimal.

$$C'_1 = -2 * C''_2$$

$$C''_2 = -2,40874 - 39,748 * (1 + h_{AC})^{-2,856}$$

$C_1 = 4,0$ (Factor local para Costa Rica)

$C_2 = 3,7969$ (Factor local para Costa Rica)

h_{AC} = Espesor de MAC en pulgadas.

$$S_e = 0,5 + \frac{12}{1 + e^{1,308 - 2,949 * \log D}} \quad (\text{Ec. 504 - 05})$$

$$FC_{B-U} - P = FC_{B-U} + S_e FC_{B-U} * Z_p \quad (\text{Ec. 504 - 06})$$

Donde,

$FC_{B-U} - P$ = Agrietamiento de abajo hacia arriba por fatiga, porcentaje por área de carril, ajustado a nivel de confianza del Proyecto.

FC_{B-U} = Agrietamiento de abajo hacia arriba por fatiga, porcentaje por área de carril, al 50 % de confiabilidad.

$S_e FC_{B-U}$ = Error estándar agrietamiento de abajo hacia arriba por fatiga.

Z_p = Valor de "z" de la distribución normal estándar para el nivel de confianza definido.

En la Tabla C2-45 se muestra un resumen del daño acumulado por año y el porcentaje de área agrietada FC_{B-U} . A continuación, se presenta a modo de ejemplo, la memoria de cálculo para el año 15:

El primer paso consiste en la estimación de los ESAL's acumulados en el año de interés (año 15 en este caso).

ESAL año 15 = 23 021 499

El segundo paso consiste en determinar el daño acumulado al año de interés.

$$D = \sum_{i=1}^{15} \frac{23\,021\,499}{1\,304\,281\,886\,621} = 0,0\%$$

$$C''_2 = -2,40874 - 39,748 * (1 + 6,299)^{-2,856} = -2,545$$

$$C'_1 = -2 * (-2,545) = 5,090$$

$$C_1 = 4,0 \text{ (Factor local para Costa Rica)}$$

$$C_2 = 3,7969 \text{ (Factor local para Costa Rica)}$$

$$FC_{B-U} = \left(\frac{6000}{1 + e^{(4*5,090 + 3,7969 * -2,545 * \log(0,0*100))}} \right) * \left(\frac{1}{60} \right) = 0,0\%$$

$$S_e = 0,5 + \frac{12}{1 + e^{1,308 - 2,949 * \log(0,0*100)}} = 0,50\%$$

$$Z_{95\%} = 1,645 \text{ (recuperado de distribución normal estándar)}$$

$$FC_{B-U} = 0,0 + 0,50 * 1,645 = 0,824 \%$$

Tabla C2-45

Resultados de daño acumulado y porcentaje de agrietamiento

Año	ESAL's año	ESAL's acumulado	Daño acumulado (%)	Se	FC (%)	FC confiabilidad (95 %)
1	1372046	1372046	0,0 %	0,000	0,500	0,822
2	1393626	2765672	0,0 %	0,000	0,500	0,823
3	1414740	4180413	0,0 %	0,000	0,500	0,823
4	1436320	5616733	0,0 %	0,000	0,500	0,823
5	1457900	7074633	0,0 %	0,000	0,500	0,823
6	1485942	8560575	0,0 %	0,000	0,500	0,823
7	1501526	10062101	0,0 %	0,000	0,500	0,823
8	1536826	11598928	0,0 %	0,000	0,500	0,823
9	1551614	13150541	0,0 %	0,000	0,500	0,823
10	1580121	14730663	0,0 %	0,000	0,501	0,823
11	1609426	16340089	0,0 %	0,000	0,501	0,823

Año	ESAL's año	ESAL's acumulado	Daño acumulado (%)	Se	FC (%)	FC confiabilidad (95 %)
12	1624679	17964768	0,0 %	0,000	0,501	0,824
13	1660911	19625679	0,0 %	0,000	0,501	0,824
14	1683423	21309102	0,0 %	0,000	0,501	0,824
15	1712397	23021499	0,0 %	0,000	0,501	0,824
16	1741836	24763335	0,0 %	0,000	0,501	0,824
17	1764814	26528148	0,0 %	0,000	0,501	0,824
18	1794719	28322867	0,0 %	0,000	0,501	0,824
19	1830951	30153819	0,0 %	0,000	0,501	0,825
20	1861323	32015141	0,0 %	0,000	0,501	0,825

En la tabla anterior se puede observar que el área agrietada por carril es de 0,825 %, por tanto, la fatiga en la mezcla asfáltica no representa un deterioro crítico, lo cual es congruente a lo esperado en pavimentos semirrígido. Es debido a que las deformaciones máximas a tensión se generan en la fibra inferior de la base estabilizada. En la Figura C2-30 se muestra el porcentaje de área agrietada.

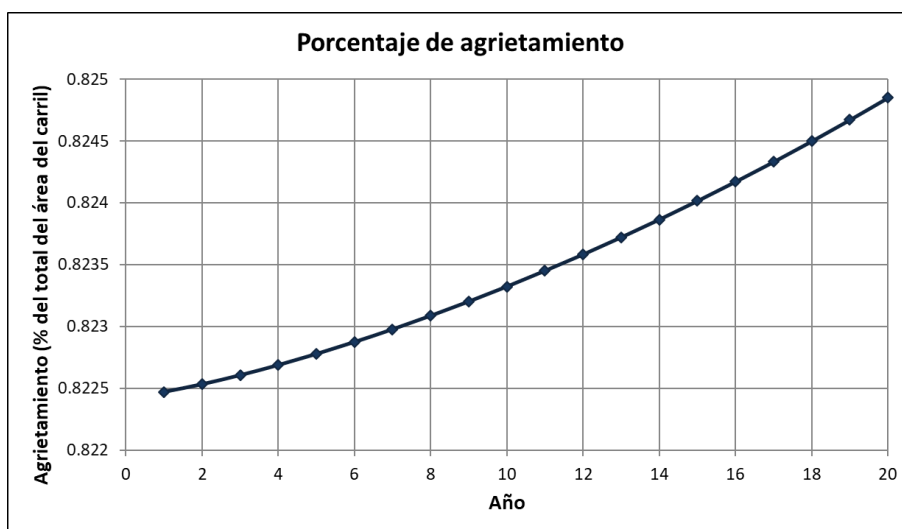


Figura C2-30

Porcentaje de agrietamiento para la estructura original

30. Verificación del agrietamiento por fatiga (arriba hacia abajo)

Según el modelo AASHTOWare calibrado para Costa Rica:

$$M = 4,84 \left[\frac{11,33}{4 + 11,33} - 0,69 \right] = 0,237$$

$$C = 10^{0,297} = 1,728$$

Para agrietamiento de arriba hacia abajo:

$$k'_1 = \frac{1}{0,01 + \frac{12}{1 + e^{(15,76 - 2,8186 * 6,299)}}} = 0,094$$

$$N_f = 0,007566 * C * k'_1 * bf_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{(3,9492 * bf_2)} \left(\frac{1}{E^*} \right)^{(1,281 * bf_3)}$$

Donde los parámetros bf_1 , bf_2 y bf_3 son factores de calibración locales para Costa Rica, que en este caso tienen valores de: $bf_1 = 0,9739$, $bf_2 = 0,9948$ y $bf_3 = 1,0907$
Sustituyendo en la ecuación anterior:

$$N_f = 0,007566 * 1,728 * 0,094 * 0,9739 * \left(\frac{1}{2,89 * 10^{-6}} \right)^{(3,9492 * 0,9948)} \left(\frac{1}{568\,526\,psi} \right)^{(1,281 * 1,0907)}$$

$$= 62\,571\,424\,760$$

Daño acumulado y longitud de grietas

El cálculo del daño, al igual que en caso anterior, se realiza con base en la teoría de Miner, por lo tanto, se utiliza la Ecuación 402-06 mostrada en la Sección 402 Daño Acumulado y Desviación Lateral de esta guía. Para determinar el área agrietada considerando la confiabilidad, se utilizan las expresiones que se presentan en las Ecuaciones 502-08 y 504-08.

$$FC_{Top-D} = 10,56 \left(\frac{C_4}{1 + e^{(C_1 * B_1 - C_2 * B_2 * \text{Log}(D_{Top} * 100))}} \right) \quad \text{Ec. 502-08}$$

Donde,

FC_{Top} = Longitud de grietas longitudinales que inician en la superficie de la MAC en pies/milla (ft/mi).

D_{Top} = Daño por fatiga de arriba hacia abajo, en decimal.

- $C_1 = 7,00$
- $C_2 = 3,50$

- $C_4 = 1000$

Factores locales para Costa Rica

- $B_1 = 1,3637$
- $B_2 = 0,9881$

$$S_{eFC_{Top-D}} = 165,68 * \text{Log}(D_{Top} * 100) + 542,53 \quad \text{Ec. 504-07}$$

Donde,

$S_{eFC_{Top-D}}$ = Error estándar agrietamiento de abajo hacia arriba por fatiga.

$S_{eFC_{Top-D}}$ = limitado a 700 ft/mi (aproximadamente 133 m/km).

$$FC_{Top-D} - P = FC_{Top-D} + S_{eFC_{Top-D}} * Z_p \quad \text{Ec. 504-08}$$

Donde,

$FC_{Top-D} - P$ = Longitud de grietas longitudinales que inician en la superficie de la MAC en pies/milla (ft/mi), ajustado a nivel de confianza del Proyecto.

FC_{Top-D} = Longitud de grietas longitudinales que inician en la superficie de la MAC en pies/milla (ft/mi), al 50 % de confiabilidad.

$S_{eFC_{Top-D}}$ = Error estándar agrietamiento de arriba hacia abajo.

Z_p = Valor de "z" de la distribución normal estándar para el nivel de confianza definido.

En la Tabla C2-46 se muestra un resumen del daño acumulado por año y el agrietamiento longitudinal. A continuación, se presenta modo de ejemplo, la memoria de cálculo para el año 15:

El primer paso consiste en la estimación de los ESAL's acumulados en el año de interés (año 15 en este caso).

ESAL año 15 = 23 021 499

El segundo paso consiste en determinar el daño acumulado al año de interés.

$$D = \sum_{i=1}^{15} \frac{23\,021\,499}{62\,571\,424\,760} = 0,0\%$$

$$FC_{Top-D} = 10,56 \left(\frac{1000}{1 + e^{(7,00 \times 1,3637 - 3,50 \times 0,9881 \times \text{Log}(0,0 \times 100))}} \right) = 0,0 \text{ ft/mi}$$

$$S_{eFC_{Top-D}} = 165,68 * \text{Log}(0,0 * 100) + 542,53 = 304,905 \text{ ft/mi}$$

$$FC_{Top-D} - P = FC_{Top-D} + S_{eFC_{Top-D}} * Z_p$$

$$Z_{95\%} = 1,645 \text{ (recuperado de distribución normal estándar)}$$

$$FC_{Top-D} = 0,0 + 304.905 * 1,645 = 501.529 \text{ ft/mi}$$

Tabla C2-46

Resultados de daño acumulado y longitud de grietas

Año	ESAL's año	ESAL's acumulado	Daño acumulado (%)	Se	FC (ft/mi)	FC confiabilidad (95 %)
1	1372046	1372046	0,0 %	0,0	101,986	167,752
2	1393626	2765672	0,0 %	0,0	152,424	250,715
3	1414740	4180413	0,0 %	0,0	182,150	299,611
4	1436320	5616733	0,0 %	0,0	203,401	334,565
5	1457900	7074633	0,0 %	0,0	220,005	361,878
6	1485942	8560575	0,0 %	0,0	233,724	384,442
7	1501526	10062101	0,0 %	0,0	245,352	403,569
8	1536826	11598928	0,0 %	0,0	255,579	420,392
9	1551614	13150541	0,0 %	0,0	264,613	435,252
10	1580121	14730663	0,0 %	0,0	272,777	448,682
11	1609426	16340089	0,0 %	0,0	280,238	460,954
12	1624679	17964768	0,0 %	0,0	287,059	472,174
13	1660911	19625679	0,0 %	0,0	293,422	482,640
14	1683423	21309102	0,0 %	0,0	299,343	492,380
15	1712397	23021499	0,0 %	0,0	304,905	501,529
16	1741836	24763335	0,0 %	0,0	310,153	510,162
17	1764814	26528148	0,0 %	0,0	315,106	518,310
18	1794719	28322867	0,0 %	0,0	319,817	526,059
19	1830951	30153819	0,0 %	0,0	324,324	533,473
20	1861323	32015141	0,1 %	0,0	328,634	540,563

La evolución del daño a través del tiempo se presenta en la Figura C2-31. En la Figura C2-32 se muestra el porcentaje de área agrietada para el mismo lapso.



Figura C2-31

Porcentaje de daño acumulado para la estructura original (agrietamiento de arriba hacia abajo)

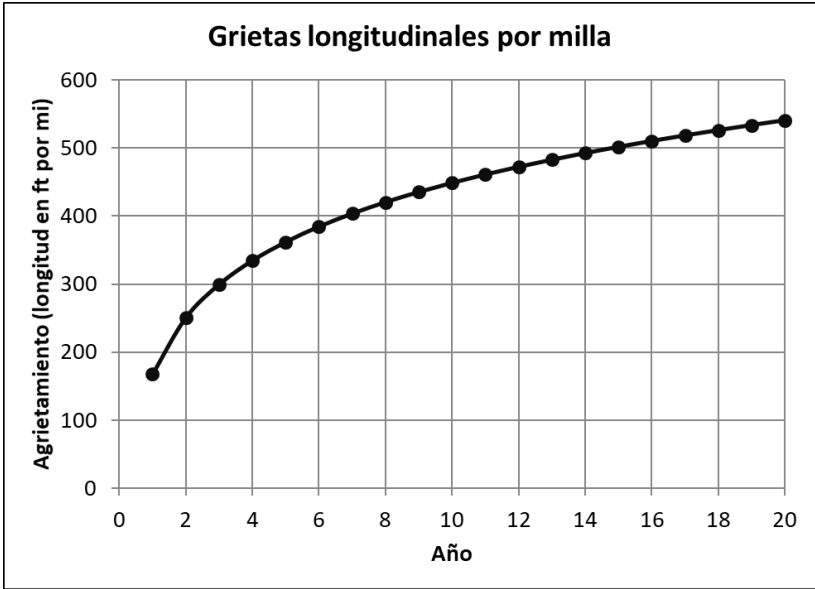


Figura C2-32

Grietas longitudinales (de arriba hacia abajo). Estructura original

Fatiga en la base estabilizada con cemento

Como la estructura posee una base estabilizada con cemento, es necesario realizar una verificación de la fatiga en esta capa, que absorbe en gran medida los esfuerzos a tensión que se presentan en la estructura. Para esto se utiliza la ecuación 503-01, que se muestra a continuación.

$$N_f = \left(\frac{\beta_{c4}}{\sigma_t / MR_{rup}} \right)^{\beta_{c3} * 20} \quad \text{Ec. 503-01}$$

Donde,

N_f = Número de repeticiones de carga para el agrietamiento por fatiga de la base estabilizada.

σ_t = Máximo esfuerzo a tensión inducido por el tráfico en la parte inferior de la capa de base estabilizada (psi).

MR : Módulo de ruptura a los 28 días (resistencia a flexión).

$\beta_{c3, c4}$: Factores de calibración en campo (psi).

$\beta_{c3}=1,0259$, y $\beta_{c4}=1,1368$, para granular.

$\beta_{c3}=0,6052$, y $\beta_{c4}=2,1154$, para material fino.

A medida de ejemplo se muestra el cálculo para la estructura en análisis, utilizando el valor de 150,2 psi (1,03 MPa) como módulo de ruptura para la base estabilizada considerada. De la modelación realizada mediante el software de multicapa elástica, se obtuvo un valor de -22,86 psi para la variable de esfuerzo a tensión en la fibra última. Con lo cual el cálculo requerido se muestra en la siguiente ecuación.

$$N_f = \left(\frac{1,1368}{|-22,86|/150,2} \right)^{1,0259 * 20} = 8,27 \times 10^{17}$$

$N_f > \text{ESAL}$ cumple fatiga

Verificación de la deformación de la mezcla asfáltica

Para calcular la deformación permanente se utilizan las ecuaciones propuestas en Subsección 501.01 Mezcla Asfáltica de la presente guía.

Procedimiento

Deformación unitaria vertical: $\varepsilon_v = 100,89 \mu s$

$T =$ Temperatura de la mezcla de $32,62 \text{ }^\circ\text{C} = 90,7 \text{ }^\circ\text{F}$.

$$C_1 = -0,1039 * 6,299^2 + 2,4868 * 6,299 - 17,342 = -5,80$$

$$C_2 = 0,0172 * 6,299^2 - 1,7331 * 6,299 + 27,428 = 17,193$$

$$k_1 = (C_1 + C_2 * d) * 0,328196^d = (-5,80 + 17,193 * 6,299) * 0,328196^{6,299} = 1,4469$$

$$\frac{\varepsilon_p}{100,89 * 10^{-6} \text{ in/in}} = 10^{-3,35412} 90,7^{1,5606} (32\ 015\ 141)^{0,479244}$$

$$\varepsilon_p \left(\frac{\text{in}}{\text{in}} \right) = 0,20$$

$$\text{Deformación total} = \varepsilon_p * k_1 = 0,20 * 1,4469 = 0,289 \text{ in} = 0,734 \text{ cm}$$

Dentro del cálculo de deformación permanente deben tomarse en cuenta la confiabilidad. Para la mezcla asfáltica es determinado como se indica en la Ecuación 504-02. En este ejemplo se utilizó un nivel de confianza de 95%.

$$Se_{MAC} = 0,24 * \delta_{MAC}^{0,8026} + 0,001$$

$$Se_{MAC} = 0,24 * 0,289^{0,8026} + 0,001 = 0,089 \text{ in} = 0,23 \text{ cm}$$

Verificación de la deformación de las capas granulares

Para calcular la deformación permanente se utilizan las ecuaciones propuestas en la Subsección 501.02 Materiales granulares, de la presente guía.

Procedimiento para la Base

Tomando en cuenta que:

Profundidad del nivel freático (GTW): $7,75 \text{ m} = 25,43 \text{ ft}$

$$W_c = 51,712 \left[\left(\frac{600\,000}{2555} \right)^{\frac{1}{0,64}} \right]^{-0,3586 * 25,43^{0,1192}} = 0,58$$

$$\log \beta = -0,61119 - 0,017638 * 0,58 = -0,621$$

$$\beta = 10^{-0,621} = 0,239$$

$$\rho = 10^9 \left[\frac{\ln \left[\frac{(0,15)}{20} \right]}{1 - (10^9)^{0,239}} \right]^{\frac{1}{0,239}} = 787,58$$

$$\left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) = \frac{(e^{(787,58)^{0,239}} * 0,15) + (e^{(787,58/10^9)^{0,239}} * 20)}{2} = 20,71$$

$$\delta_a = \beta_{BG} * \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) e^{-\left[\frac{p}{N} \right]^\beta} \varepsilon_v h =$$

$$2,03 * (20,71) e^{-\left[\frac{787,58}{32\,015\,141} \right]^{0,239}} * \left(16,85 * 10^{-6} \frac{in}{in} \right) * 12,992 = 0,009 \text{ in} = 0,022 \text{ cm}$$

Para la base el ahuellamiento es determinado como se indica en la Ecuación 504-03. En este ejemplo se utilizó un nivel de confianza de 95%.

$$Se_{Granular} = 0,1235 * \delta_{Granular}^{0,5012} + 0,001$$

$$Se_{base} = 0,1235 * 0,009^{0,5012} + 0,001 = 0,013 \text{ in} = 0,032 \text{ cm}$$

Procedimiento para la Subbase

$$W_c = 51,712 \left[\left(\frac{19\,975}{2555} \right)^{\frac{1}{0,64}} \right]^{-0,3586 * 25,43^{0,1192}} = 9,50$$

$$\log \beta = -0,61119 - 0,017638 * 9,50 = -0,779$$

$$\beta = 10^{-0,779} = 0,166$$

$$\rho = 10^9 \left[\frac{\ln \left[\frac{(0,15)}{20} \right]}{1 - (10^9)^{0,166}} \right]^{\frac{1}{0,166}} = 16868,86$$

$$\left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r}\right) = \frac{(e^{(16868,86)^{0,166}} * 0,15) + (e^{(16868,86/10^9)^{0,166}} * 20)}{2} = 23,48$$

$$\delta_a = \beta_{BG} * \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r}\right) e^{-\left[\frac{p}{N}\right]^\beta} \varepsilon_v h =$$

$$2,03 * (23,48) e^{-\left[\frac{16868,86}{32\ 015\ 141}\right]^{0,166}} * \left(53,14 * 10^{-6} \frac{in}{in}\right) * 13,78 = 0,026\ in = 0,066\ cm$$

Para la capa de subbase granular el ahuellamiento se determina como se indica en la Ecuación 504-03. En este ejemplo se utilizó un nivel de confianza de 95%.

$$Se_{Granular} = 0,1235 * \delta_{Granular}^{0,5012} + 0,001$$

$$Se_{subbase} = 0,1235 * 0,026^{0,5012} + 0,001 = 0,021\ in = 0,053\ cm$$

Procedimiento para la Subrasante

$$W_c = 51,712 \left[\left(\frac{6828}{2555} \right)^{\frac{1}{0,64}} \right]^{-0,3586 * 25,43^{0,1192}} = 23,00$$

$$\log \beta = -0,61119 - 0,017638 * 23,00 = -1,017; \beta = 10^{-1,017} = 0,096$$

$$\rho = 10^9 \left[\frac{\ln \left[\frac{(0,15)}{20} \right]}{1 - (10^9)^{0,096}} \right]^{\frac{1}{0,096}} = 67851843,69$$

$$\left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r}\right) = \frac{(e^{(67851843,69)^{0,096}} * 0,15) + (e^{(67851843,69/10^9)^{0,096}} * 20)}{2} = 42,28$$

- Para $z = 0$ in. (superficie de la subrasante)

$$\varepsilon_p = \beta_{SG} * \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r}\right) e^{-\left[\frac{p}{N}\right]^\beta} \varepsilon_v = 1,35 * (42,28) e^{-\left[\frac{67851843,69}{32\ 015\ 141}\right]^{0,096}} * \left(70,80 * 10^{-6} \frac{in}{in}\right) = 0,0014\ in$$

- Para $z = 6$ in.

$$\varepsilon_p = \beta_{SG} * \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r}\right) e^{-\left[\frac{p}{N}\right]^\beta} \varepsilon_v = 1,35 * (48,28) e^{-\left[\frac{67851843,69}{32\ 015\ 141}\right]^{0,096}} * \left(59,18 * 10^{-6} \frac{in}{in}\right) = 0,0012\ in$$

- Total, para la subrasante

$$k = \frac{1}{6} * \ln\left(\frac{\varepsilon_{p,z=0}}{\varepsilon_{p,z=6}}\right) = \frac{1}{6} * \ln\left(\frac{0,0014 \text{ in}}{0,0012 \text{ in}}\right) = 0,030$$

$$\delta = \int_0^{h_{roca}} \varepsilon_p(z) dz$$

$$\delta = \varepsilon_p(z) dz \int_0^{h_{roca}} e^{-kz} dz = \left(\frac{1 - e^{-k * h_{roca}}}{k}\right) \varepsilon_{p,z=0}$$

Donde,

δ = deformación plástica total de la subrasante, in.

h_{roca} = profundidad de la roca, pies.

$$\delta = \left(\frac{1 - e^{-0,030 * 350}}{0,030}\right) * 0,0014 = 0,047 \text{ in} = 0,12 \text{ cm}$$

Para la subrasante la deformación se determina como se indica en la Ecuación 504-04. En este ejemplo se utilizó un nivel de confianza de 95%.

$$Se_{Suelo} = 0,1477 * \delta_{Suelo}^{0,6711} + 0,001$$

$$Se_{Suelo} = 0,1477 * 0,047^{0,6711} + 0,001 = 0,020 \text{ in} = 0,051 \text{ cm}$$

Deformación permanente total

El ahuellamiento total en el año 20 se calcula según la ecuación 504-01. En este ejemplo se utilizó un nivel de confianza de 95%.

$$\delta_{total} = \delta_{MAC} + \delta_{Base} + \delta_{Subbase} + \delta_{SR} + (Se_{MAC} + Se_{Base} + Se_{Subbase} + Se_{Suelo}) * Z_p$$

$$\delta_{total} = 0,289 \text{ in} + 0,009 \text{ in} + 0,026 \text{ in} + 0,047 \text{ in} + (0,089 \text{ in} + 0,013 \text{ in} + 0,021 \text{ in} + 0,020 \text{ in}) * 1,645$$

$$\delta_{total} = 0,61 \text{ in}$$

$$\delta_{total} = \delta_{MAC} + \delta_{Base} + \delta_{Subbase} + \delta_{SR} + (Se_{MAC} + Se_{Base} + Se_{Subbase} + Se_{Suelo}) * Z_p$$

$$\delta_{total} = 0,739cm + 0,023cm + 0,066cm + 0,119cm \\ + (0,226cm + 0,033cm + 0,053cm + 0,051cm) * 1,645$$

$$\delta_{total} = 1,54 cm = 15,40 mm$$

El ahuellamiento para esta estructura es de 15,40 mm al final del período de diseño. Por tanto, se excede el umbral máximo permitido (10 mm), es decir que la estructura no cumple el criterio de deformación. En la Figura C2-33 se muestra la evolución del deterioro con el tiempo.

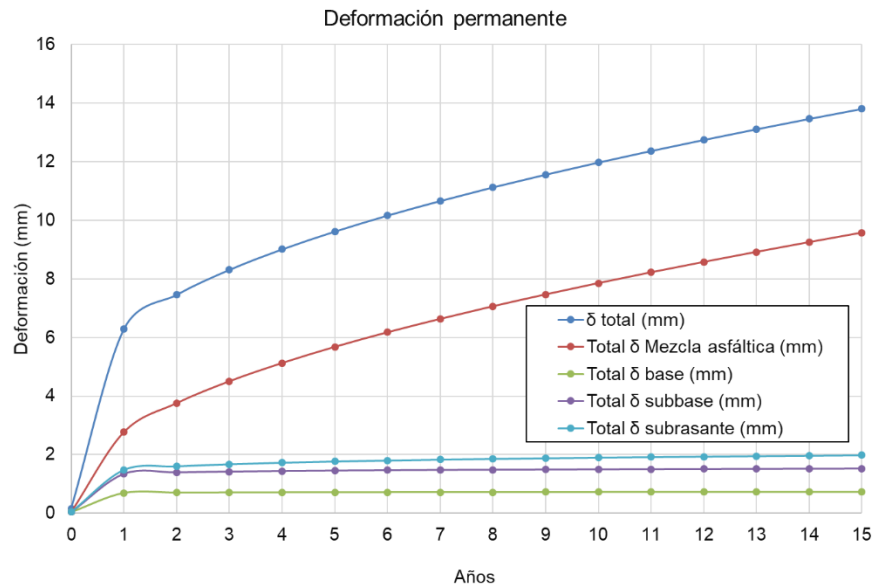


Figura C2-33

Deformación permanente en la estructura original

Observaciones

En la Tabla C2-47 se muestra un resumen de los deterioros estimados para la estructura semirrígida preliminar analizada (diseñada con AASHTO 93). Los resultados indican que existe incumplimiento en el parámetro de deformación permanente. El siguiente paso consistirá en evaluar nuevas alternativas y recalculiar el desempeño, aumentando el espesor de MAC principalmente, dado que esta capa presenta una concentración de esfuerzos con el espesor utilizado. El proceso se repetirá hasta que se alcancen valores por debajo de los límites establecidos.

Tabla C2-47*Resumen de parámetros de desempeño de la estructura original*

Deterioro	Valor	Límites
Fatiga (MEPDG) (N _r admisibles) (abajo hacia arriba)	1 304 281 886 621	---
Agrietamiento (% del total del área del carril)	0,82	10% máx.
Fatiga (MEPDG) (N _r admisibles) (arriba hacia abajo)	62 571 424 760	---
Agrietamiento (longitud en ft por mi)	540,6	1 500 ft/milla (máx.)
Fatiga en la Base estabilizada con cemento	8,27x10 ¹⁷	---
Deformación total (mm)	15,40	10 mm (máx.)

Estructura propuesta – Iteración 1Características generales de la estructura

La primera alternativa de diseño que se analizará presenta las características generales descritas en la Tabla C2-48. En esta propuesta se ha modificado únicamente el espesor de la capa bituminosa (incremento de 1 cm). Debido a que el módulo de la mezcla asfáltica depende, además de la temperatura, del espesor de la capa; se ha recalculado esta propiedad para la condición actual de la estructura. Como consecuencia de este cambio, también se ha corregido el valor de E para la subbase. El procedimiento de cálculo para todos los casos es similar al descrito previamente.

Tabla C2-48*Características generales de las capas de la estructura propuesta - iteración1*

Capa	Espesor (cm)	Módulo (psi)
CA	17	581 921
Base estabilizada	33	600 000
Subbase	35	20 004
Subrasante	-	6828

Resultados obtenidos

El incremento de 1 cm en la mezcla asfáltica redujo de forma importante la deformación permanente total. El daño por fatiga (ambos casos) se mantiene técnicamente nulo.

Tabla C2-49

Parámetros de desempeño de la estructura de iteración 1

Deterioro	Valor	Límites
Fatiga (MEPDG) (N_f admisibles) (abajo hacia arriba)	1 222 570 719 285	---
Agrietamiento (% del total del área del carril)	0,83	10% máx.
Fatiga (MEPDG) (N_f admisibles) (arriba hacia abajo)	74 902 158 846	---
Agrietamiento (longitud en ft por mi)	519,27	1 500 ft/milla (máx.)
Fatiga en la Base estabilizada con cemento	$1,86 \times 10^{18}$	---
Deformación total (mm)	13,04	10 mm (máx.)

Estructura propuesta – Iteración 2

Características generales de la estructura

La segunda alternativa de diseño que se analizará presenta las características generales descritas en la Tabla C2-50. En esta propuesta se han aumentado 2 cm tanto en la mezcla asfáltica (respecto a la iteración 1) como en la base estabilizada. Debido a que el módulo de la mezcla asfáltica depende, además de la temperatura, del espesor de la capa; se ha recalculado esta propiedad para la condición actual de la estructura. Como consecuencia de este cambio, también se ha corregido el valor de E para la subbase. El procedimiento de cálculo para todos los casos, es similar al descrito previamente.

Tabla C2-50

Características generales de las capas de la estructura propuesta - iteración 1

Capa	Espesor (cm)	Módulo (psi)
CA	19	606 826
Base estabilizada	35	600 000
Subbase	35	20 135
Subrasante	-	6828

Resultados obtenidos**Tabla C2-51***Parámetros de desempeño de la estructura de iteración 1*

Deterioro	Valor	Límites	Verificación
Fatiga (MEPDG) (N_f admisibles) (abajo hacia arriba)	1 206 646 974 768	32 015 141	Cumple
Agrietamiento (% del total del área del carril)	0,83	10% máx.	Cumple
Fatiga (MEPDG) (N_f admisibles) (arriba hacia abajo)	5 985 498 987	32 015 141	Cumple
Agrietamiento (longitud en ft por mi)	818,6	1 500 ft/milla (máx.)	Cumple
Fatiga en la Base estabilizada con cemento	$1,85 \times 10^{19}$	32 015 141	Cumple
Deformación total (mm)	9,39	10 mm (máx.)	Cumple

El resultado obtenido en esta última iteración muestra que se cumple con todos los umbrales definidos, para el nivel de análisis utilizado, por lo tanto, se puede dar por aceptada la estructura diseñada desde un punto de vista estructural. Cabe aclarar que se realizaron corridas adicionales (10 en total) con el objetivo de optimizar los espesores de una mejor forma, variando el espesor de MAC entre 16 cm - 19 cm, el espesor de BE entre 30 cm - 35 cm y el espesor de SB entre 35 y 40 cm.

ANEXO D EVALUACIÓN DE MODELOS Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Anexo D.1 Análisis de sensibilidad modelos de la GDP-2024

Se realizó una modelación de 5 000 estructuras generadas de forma aleatoria para analizar el comportamiento de los modelos. Los rangos de parámetros considerados se muestran en la Tabla D.1 Rango de valores considerados para las modelaciones.

Tabla D1-01

Rango de valores considerados para las modelaciones

Material	Rango de espesores (cm)	Rango de módulo (MPa)
MAC	7-20	500-10500
Base	15-35	70-350
Subbase	15-40	30-200
Subrasante	N/A	20-170

Adaptado de Puello 2019.

D.1.01 Análisis de sensibilidad para fatiga y área agrietada de abajo hacia arriba

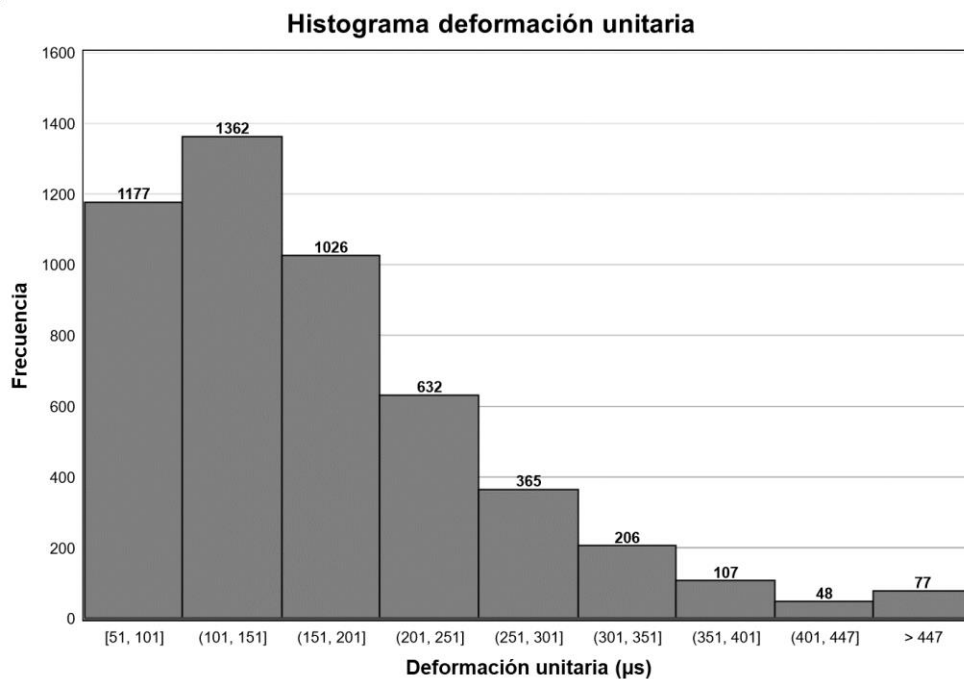


Figura D1-01

Histograma de deformación unitaria a tensión

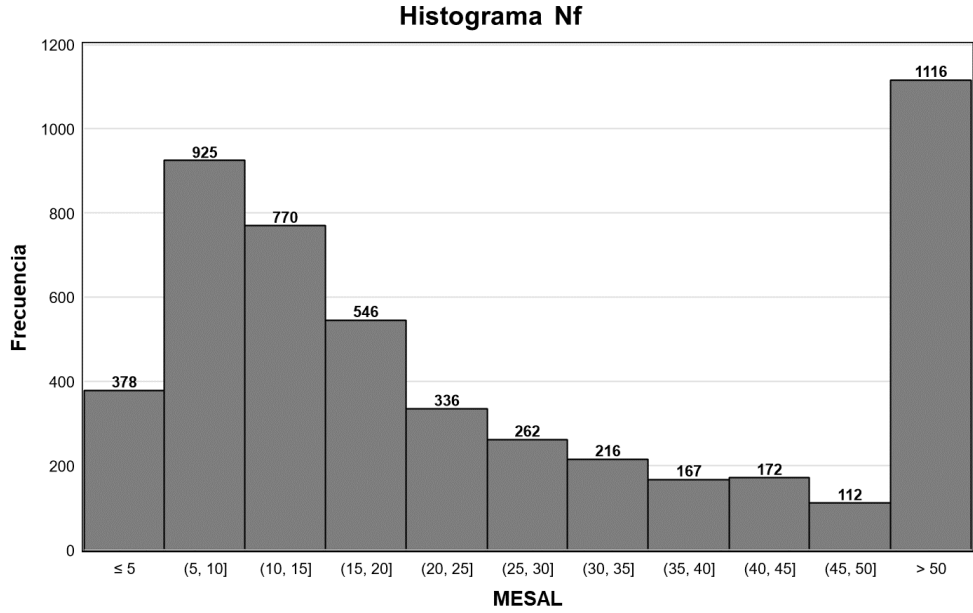


Figura D1-02
Histograma de ESAL admisibles

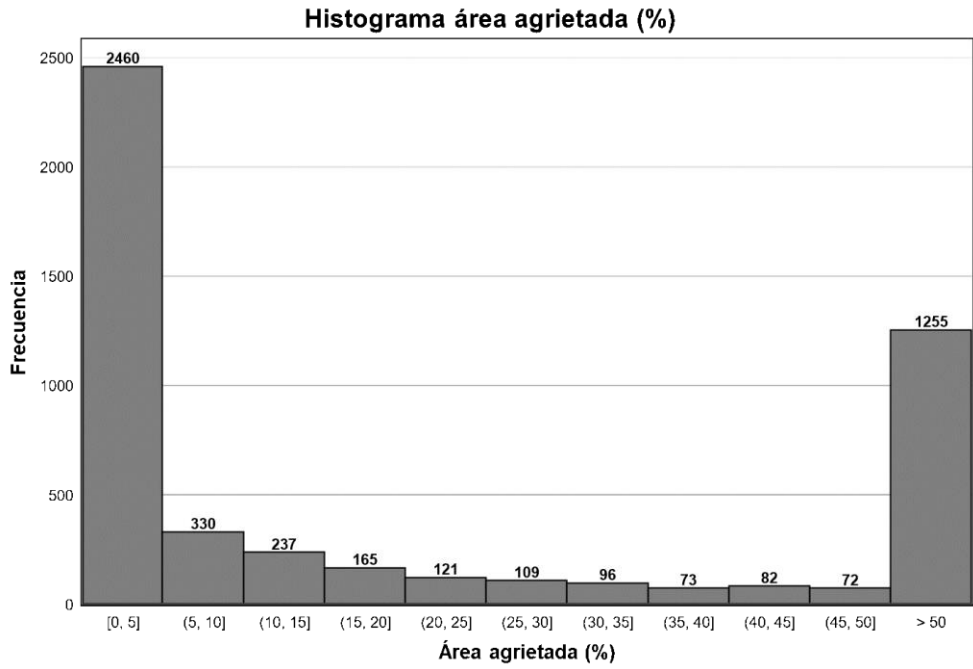


Figura D1-03
Histograma de área agrietada para 15 millones de ESAL

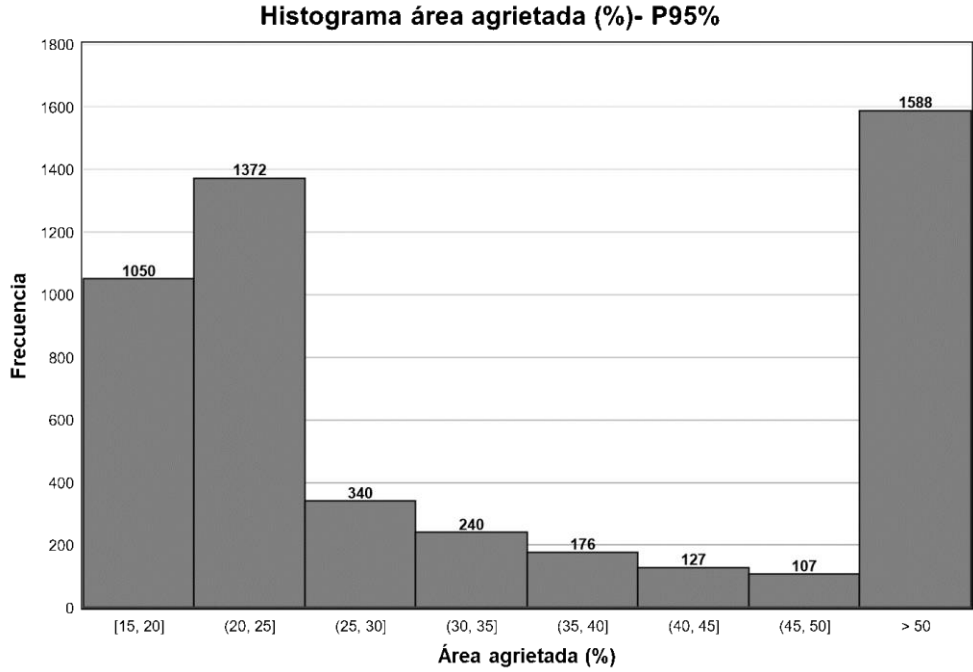


Figura D1-04

Histograma de área agrietada, confiabilidad del 95 %, para 15 millones de ESAL

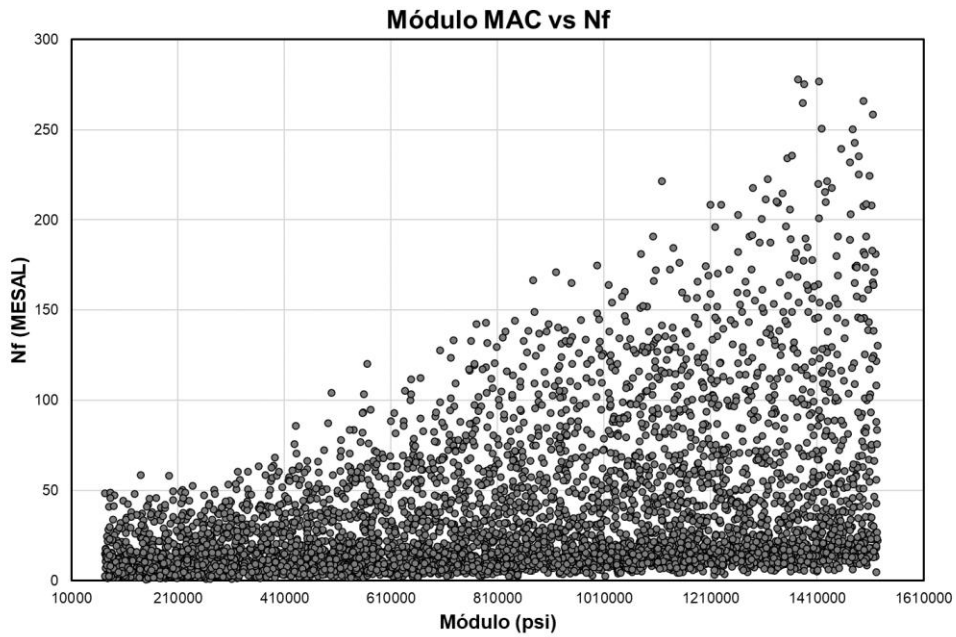


Figura D1-05

Dispersión de puntos, módulo de MAC vs ESAL admisibles

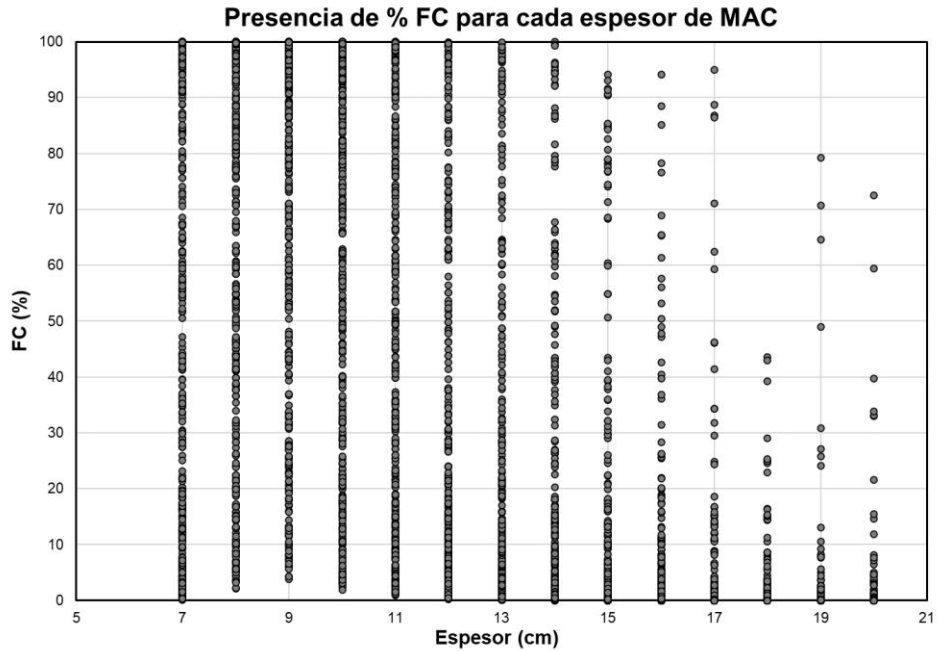


Figura D1-06

Distribución del porcentaje de área agrietada, 15 millones de ESAL, para diferentes espesores de MAC

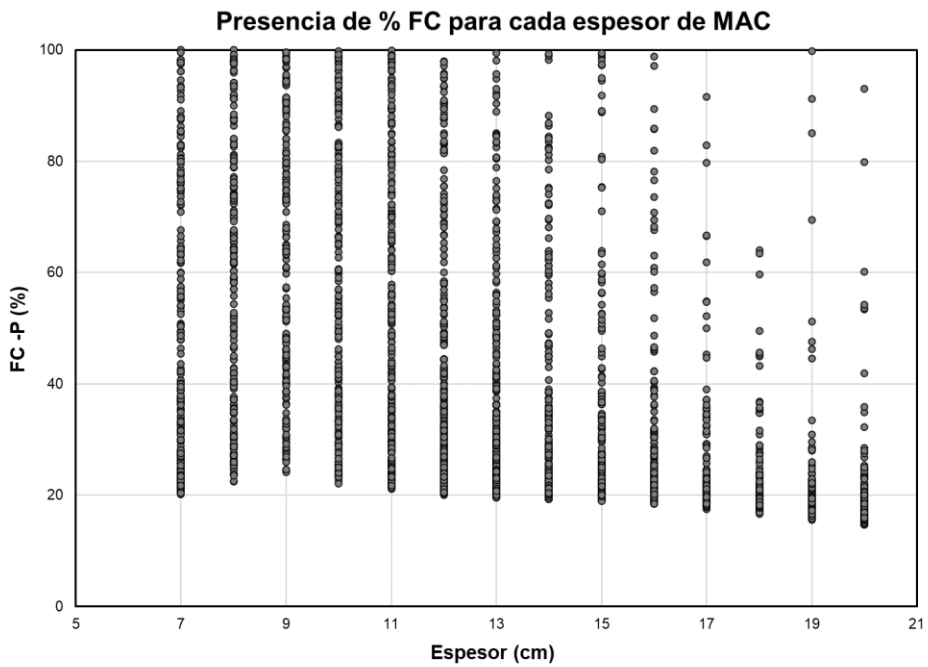


Figura D1-07

Distribución del porcentaje de área agrietada, confiabilidad de 95 % y 15 millones de ESAL, para diferentes espesores de MAC

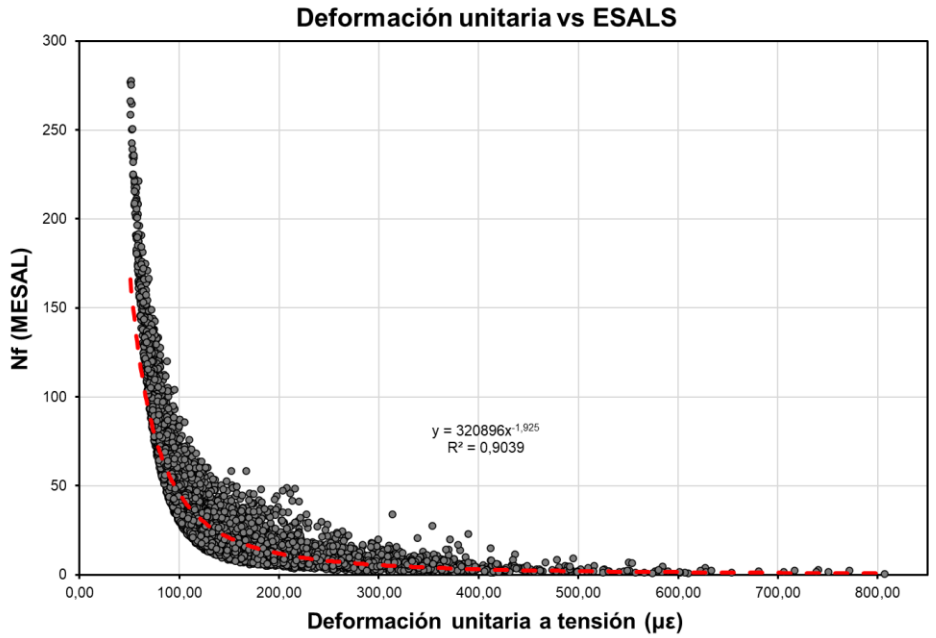


Figura D1-08

Dispersión de puntos, deformación unitaria a tensión en la MAC vs ESAL admisibles

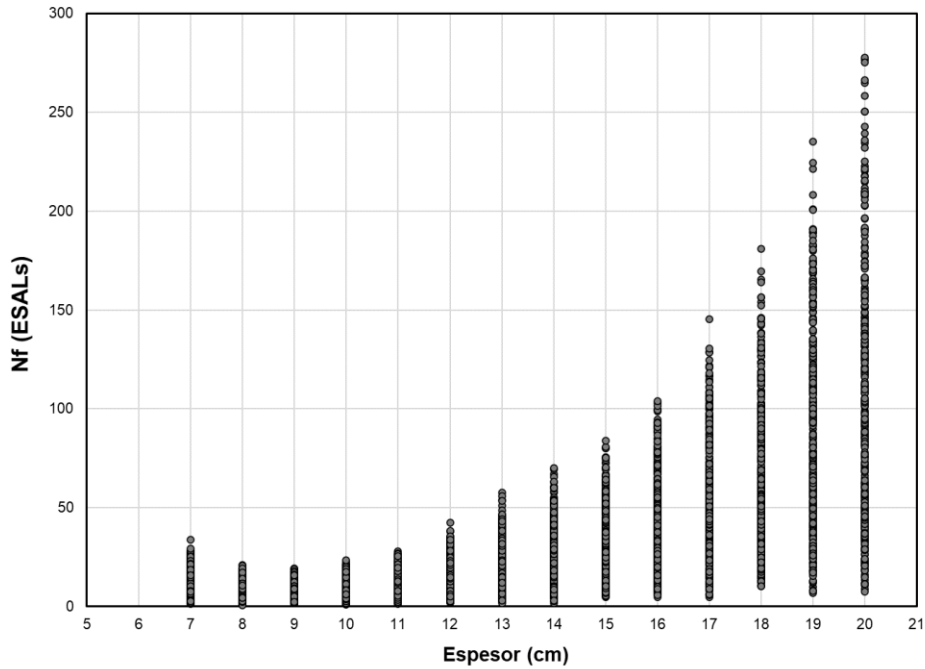


Figura D1-09

ESAL admisibles para diferentes espesores de MAC.

D.1.02
abajo

Análisis de sensibilidad para fatiga y longitud de grietas de arriba hacia

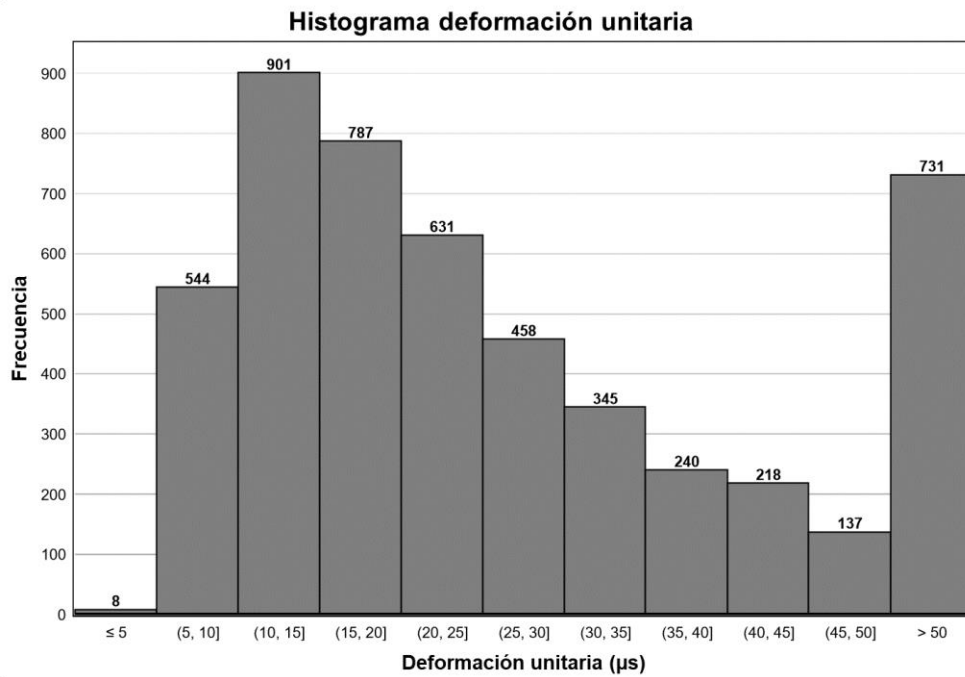


Figura D1-10

Histograma de deformación unitaria a tensión

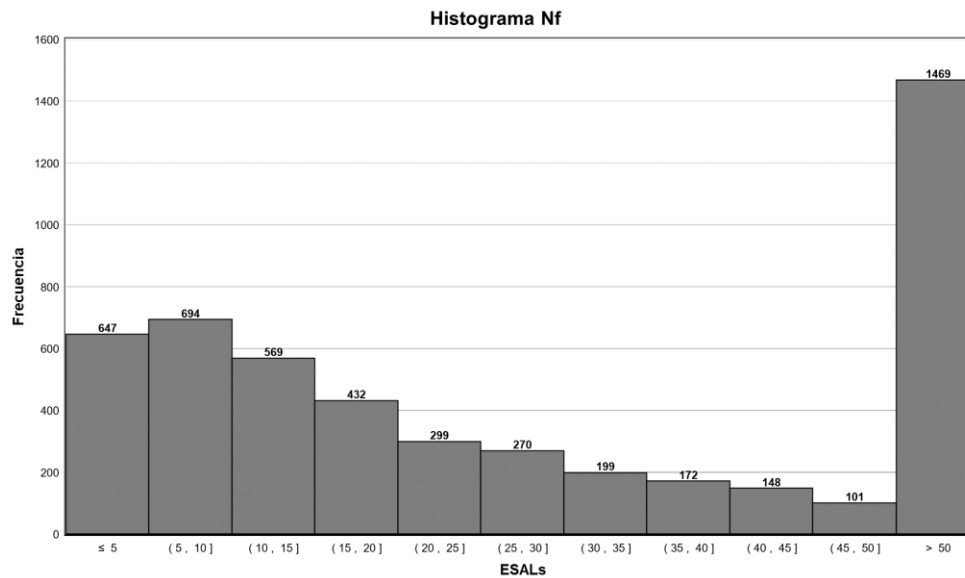


Figura D1-11

Histograma de ESAL admisibles

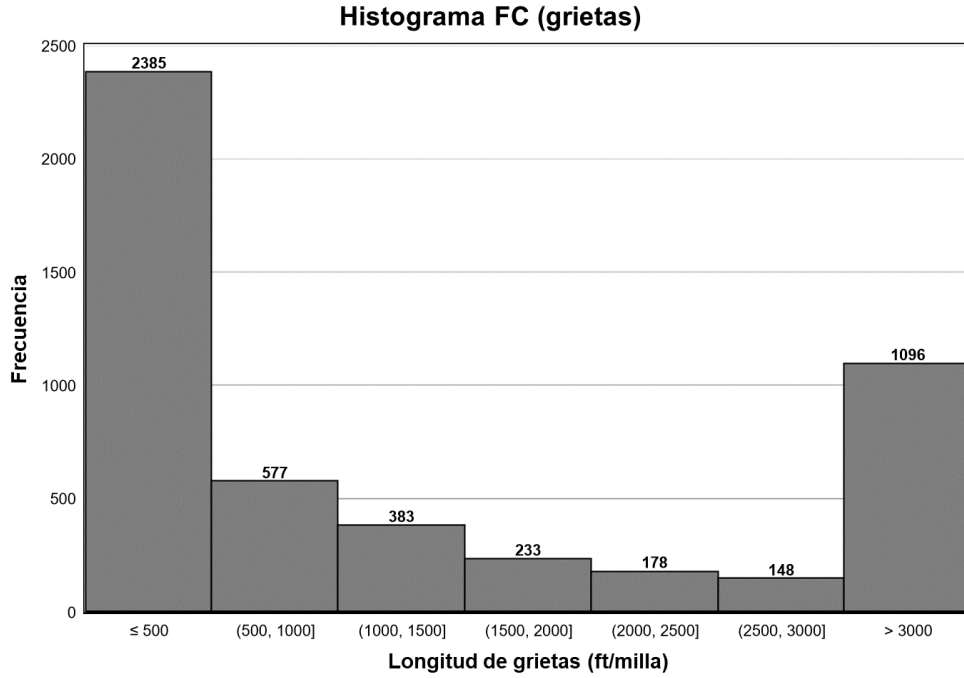


Figura D1-12

Histograma de longitud de grietas para 15 millones de ESAL

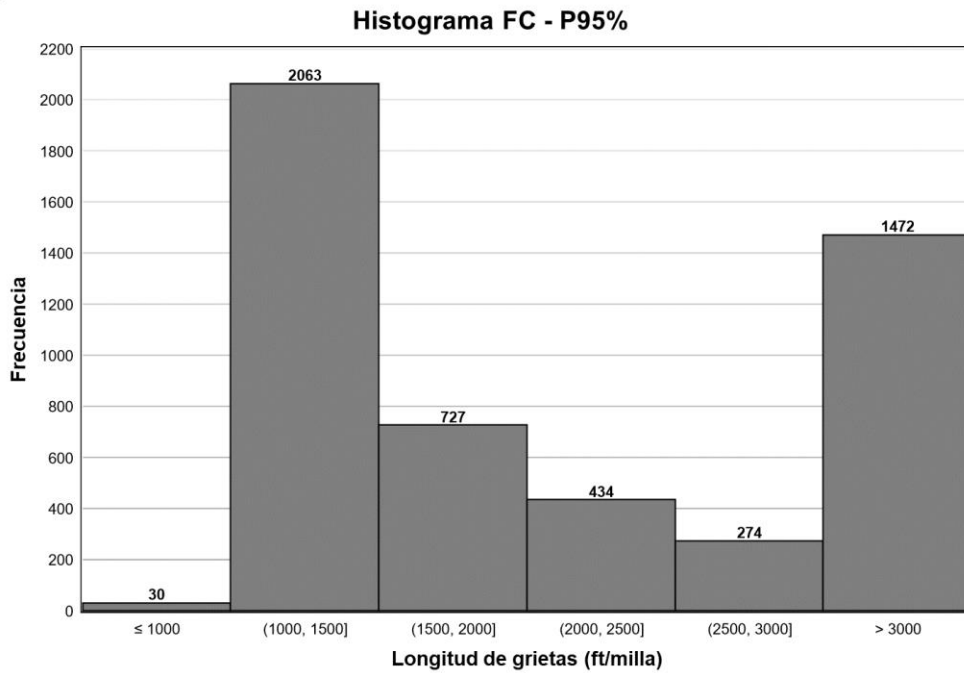


Figura D1-13

Histograma de longitud de grietas, confiabilidad del 95%, para 15 millones de ESAL

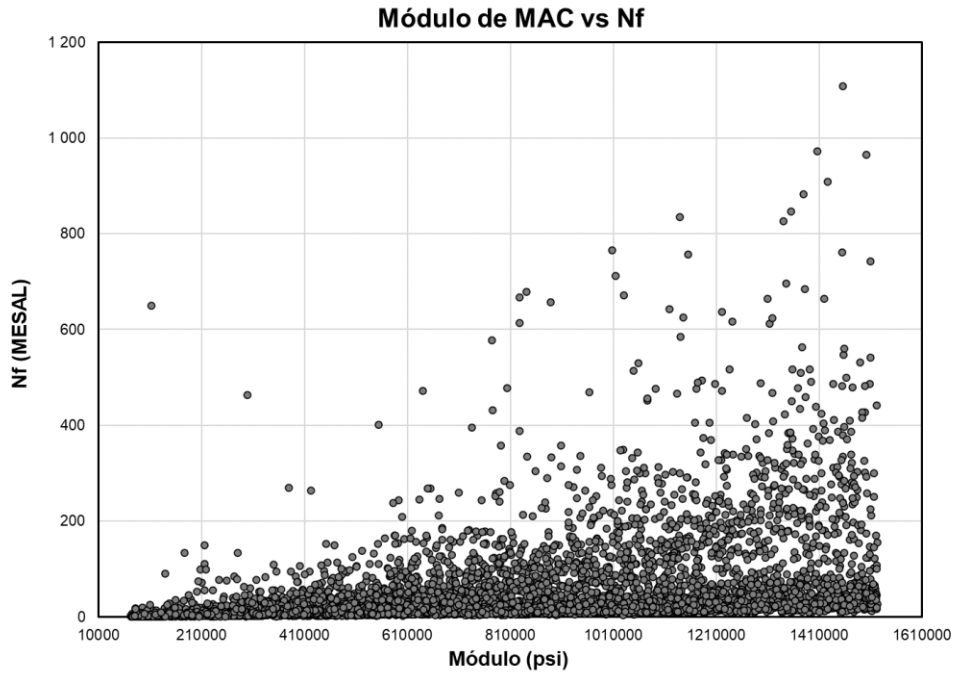


Figura D1-14

Dispersión de puntos, módulo de MAC vs ESAL admisibles

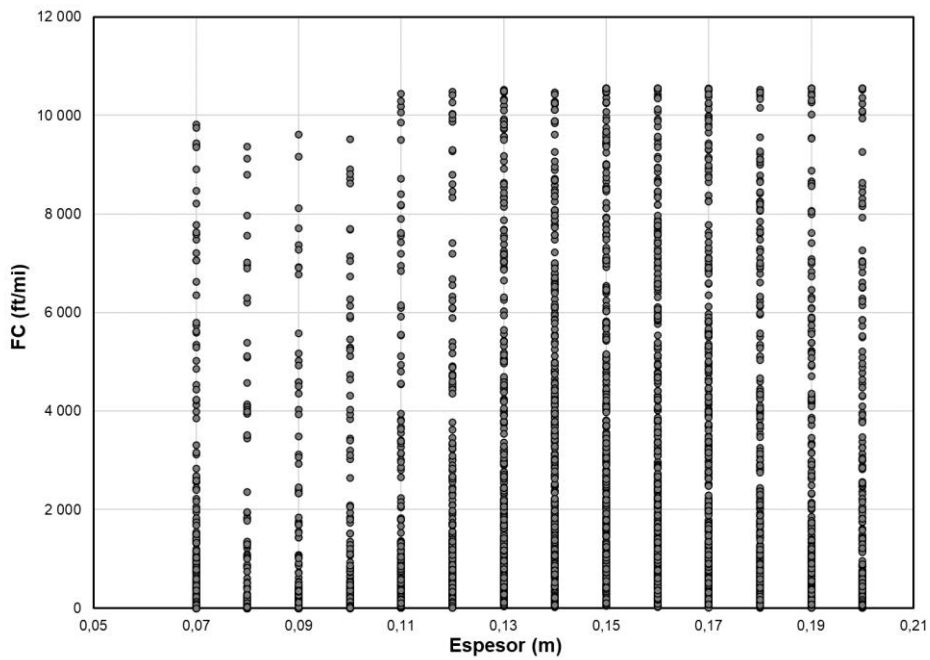


Figura D1-15

Distribución de longitud de grietas, 15 millones de ESAL, para diferentes espesores de MAC

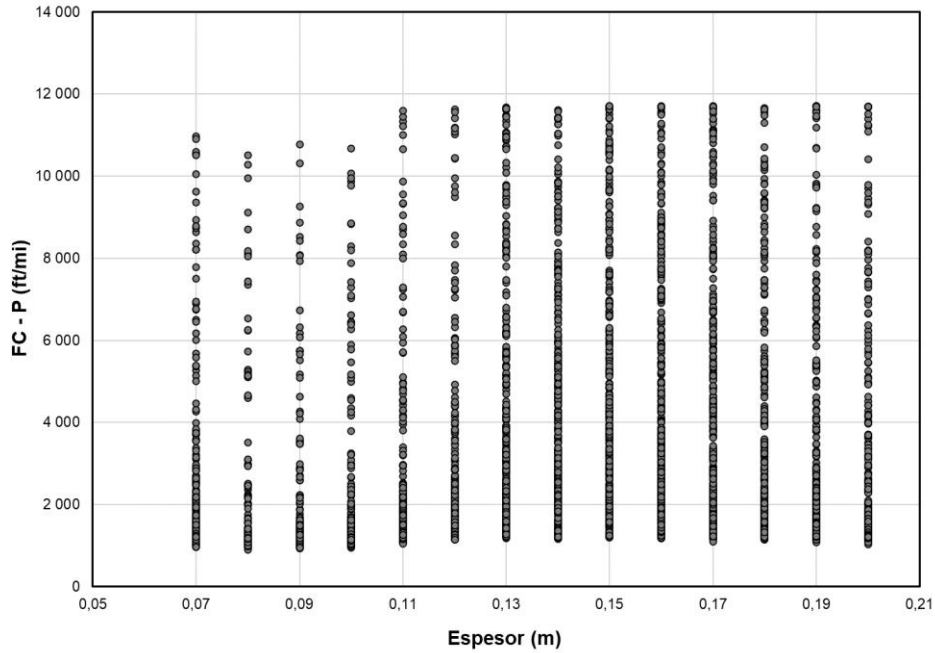


Figura D1-16

Distribución de longitud de grietas, confiabilidad de 95% y 15 millones de ESAL, para diferentes espesores de MAC

Deformación unitaria vs ESAL

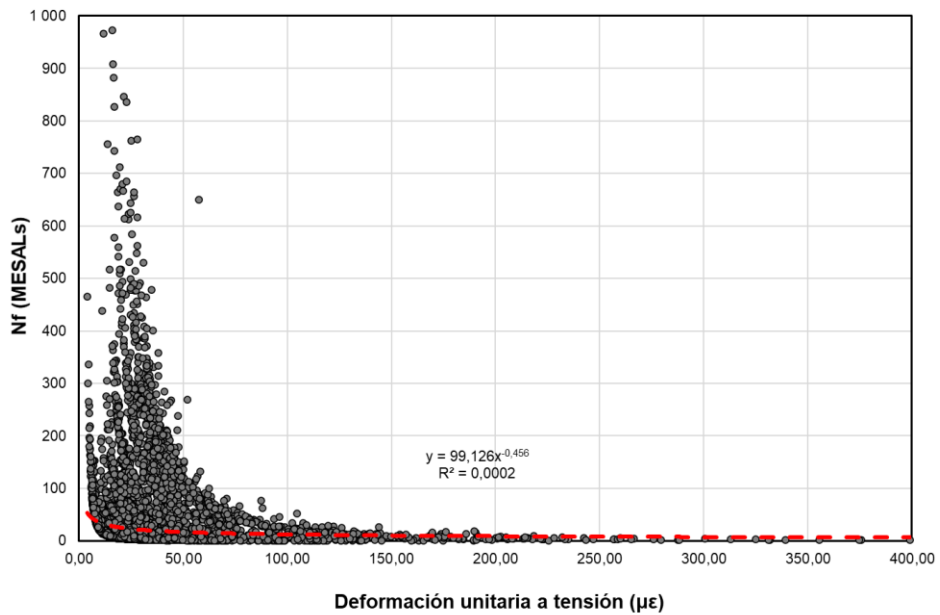


Figura D1-17

Dispersión de puntos, deformación unitaria a tensión en la MAC vs ESAL admisibles

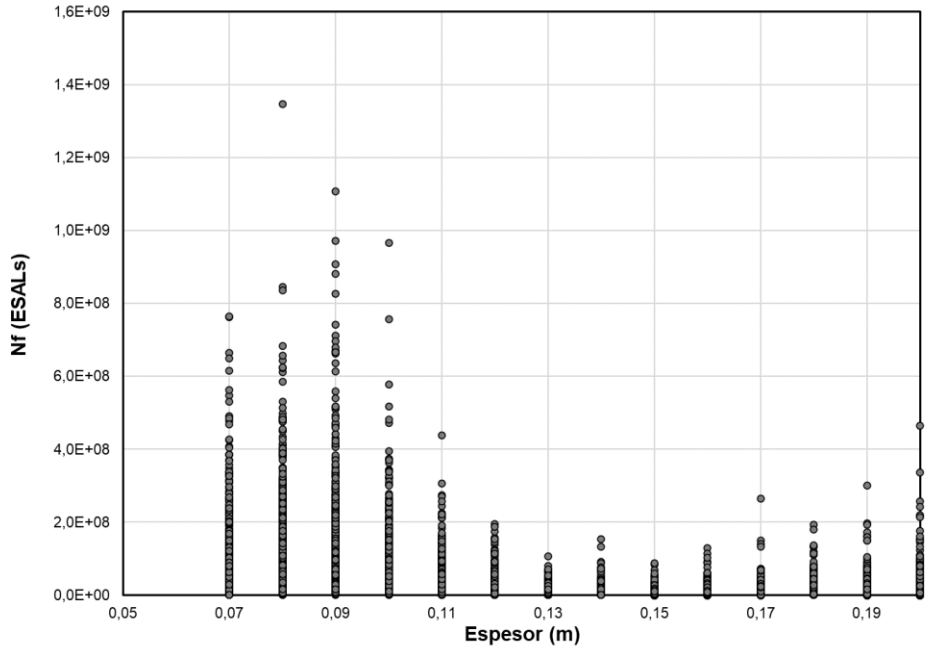


Figura D1-18

ESAL admisibles para diferentes espesores de MAC

i. D.1.03 Análisis de sensibilidad para ahuellamiento en la MAC

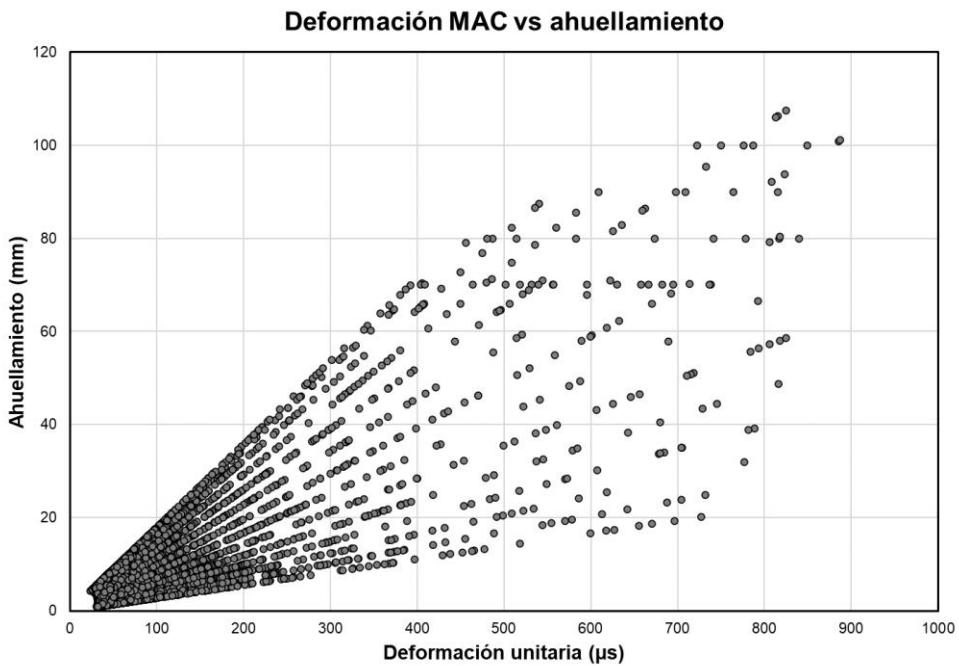


Figura D1-19

Relación ahuellamiento en la MAC vs deformación unitaria a compresión en la MAC

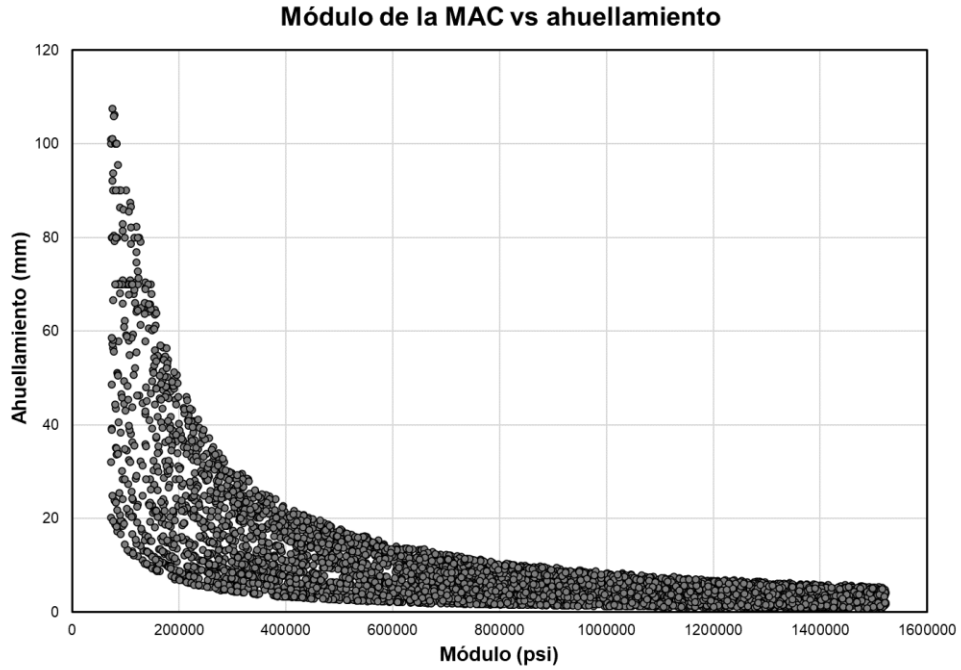


Figura D1-20

Relación ahuellamiento en la MAC vs módulo resiliente en la MAC

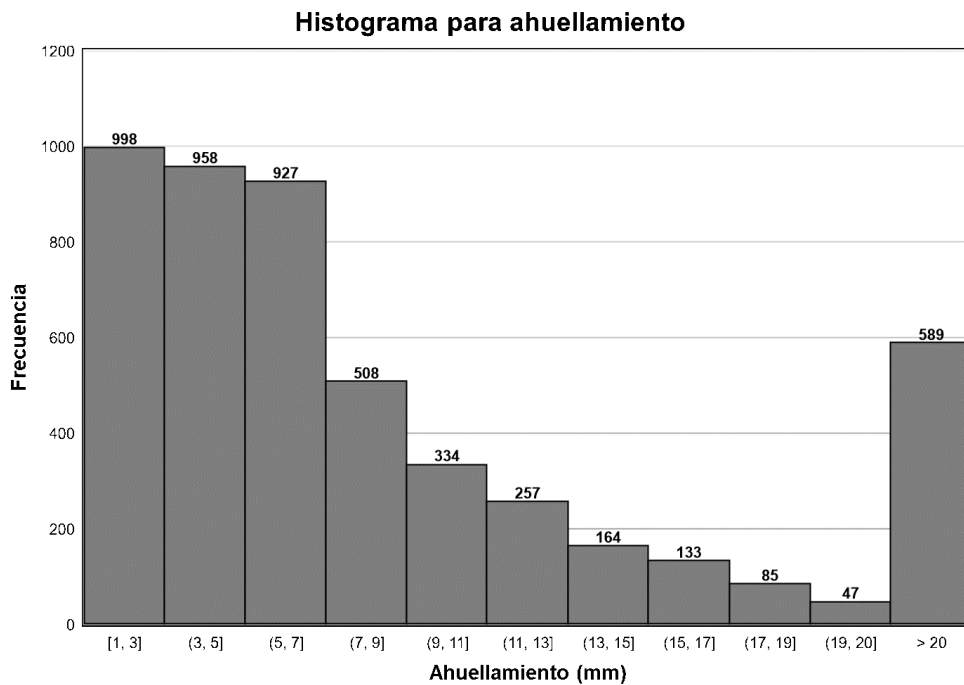


Figura D1-21

Histograma ahuellamiento en la MAC para 15 millones de ESAL

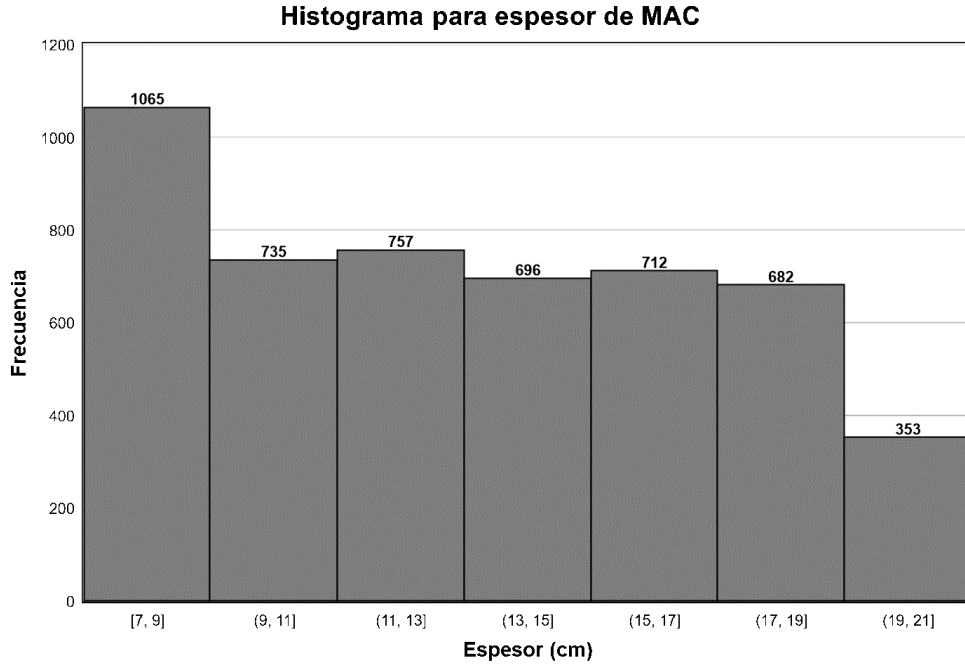


Figura D1-22

Histograma distribución de espesores de MAC

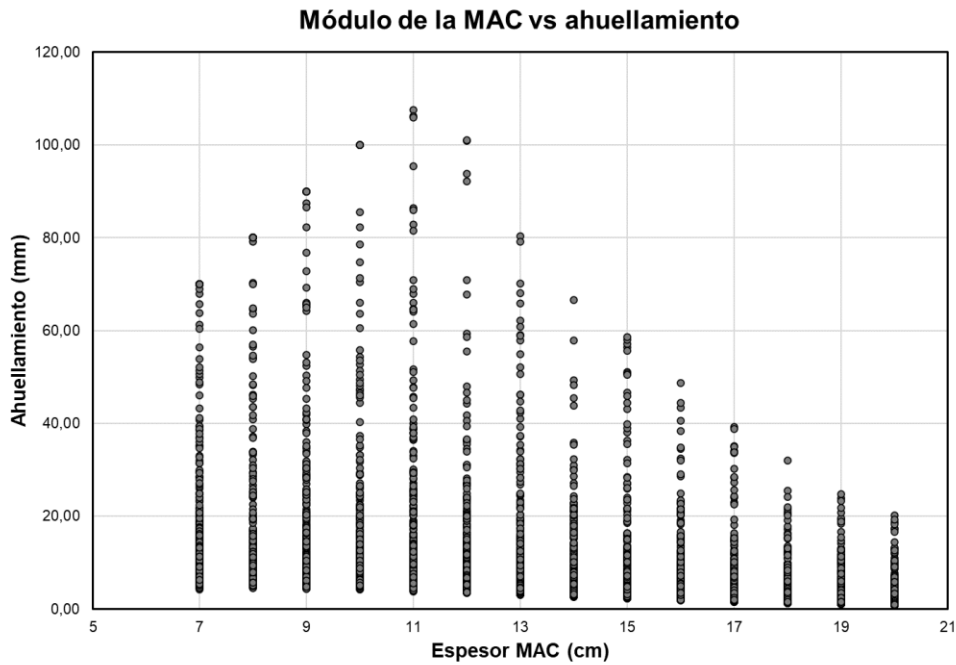


Figura D1-23

Ahuellamiento en MAC respecto al espesor de MAC

D.1.04 *Análisis de sensibilidad para ahuellamiento en la base*

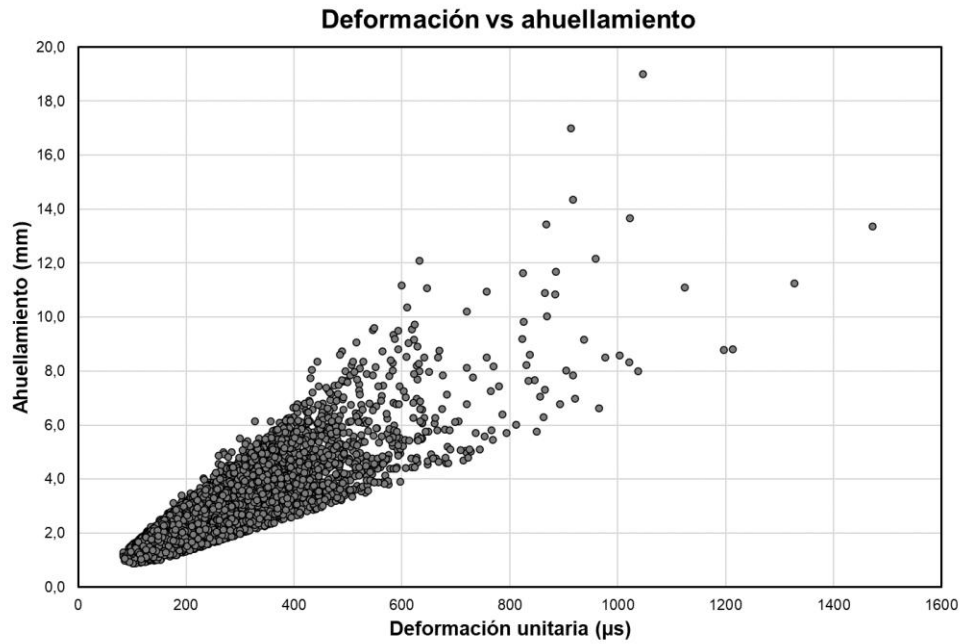


Figura D1-24

Relación ahuellamiento en la MAC vs deformación unitaria a compresión en la base

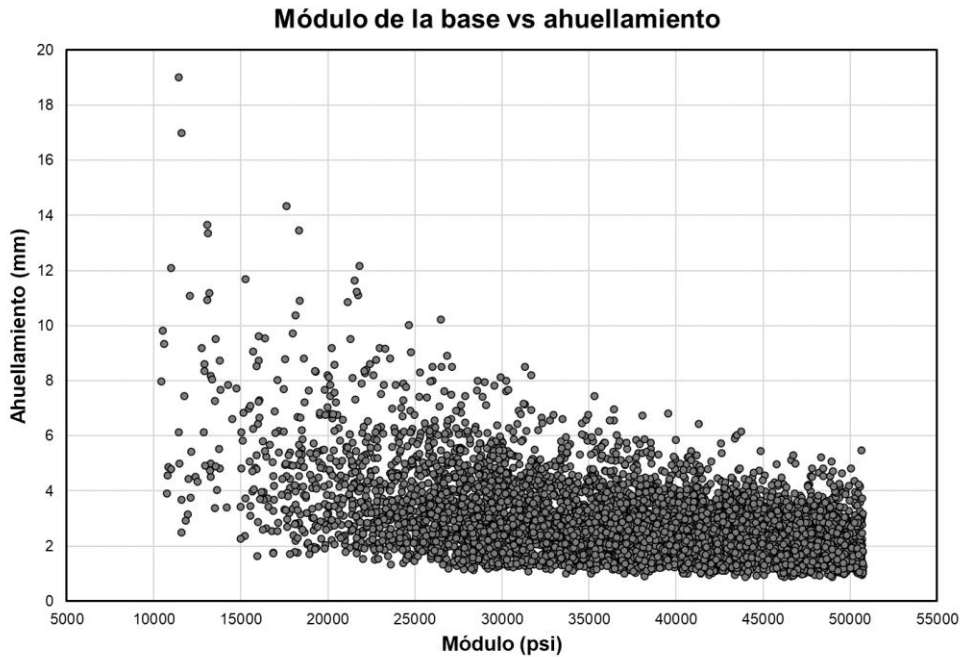


Figura D1-25

Relación ahuellamiento en la base vs módulo resiliente en la base

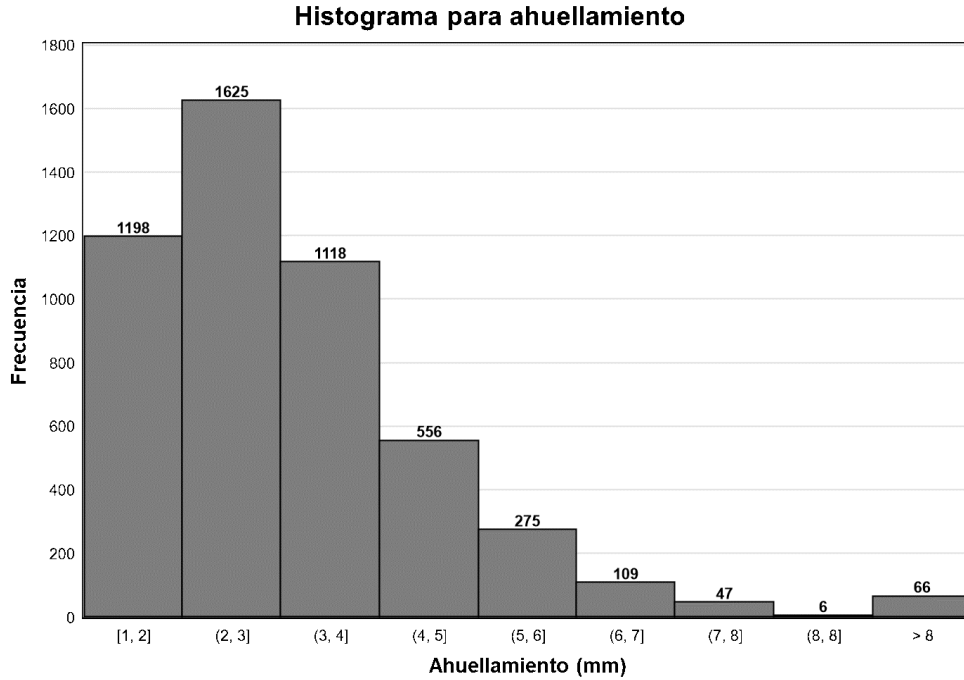


Figura D1-26

Histograma ahuellamiento en la base para 15 millones de ESAL's

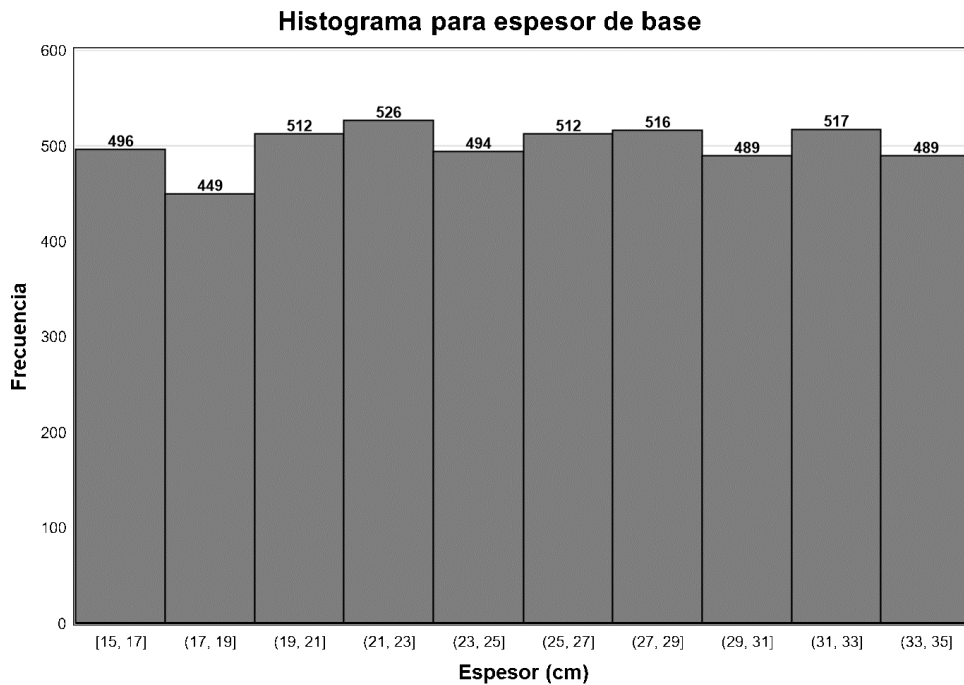


Figura D1-27

Histograma distribución de espesores de base

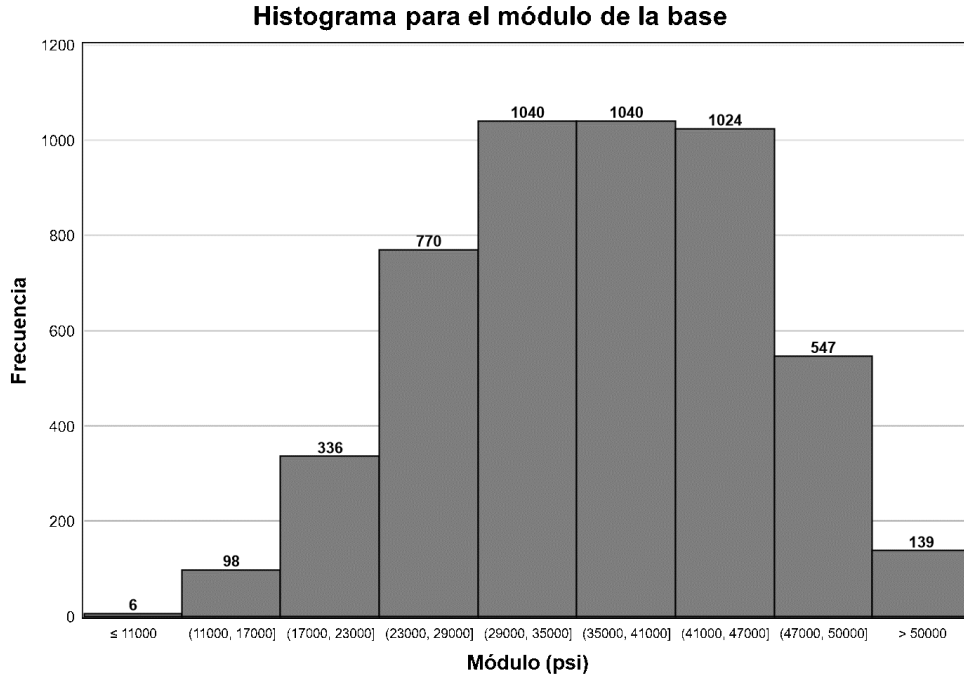


Figura D1-28

Histograma distribución de módulos resilientes de la base

D.1.05 *Análisis de sensibilidad para ahuellamiento en la subbase*

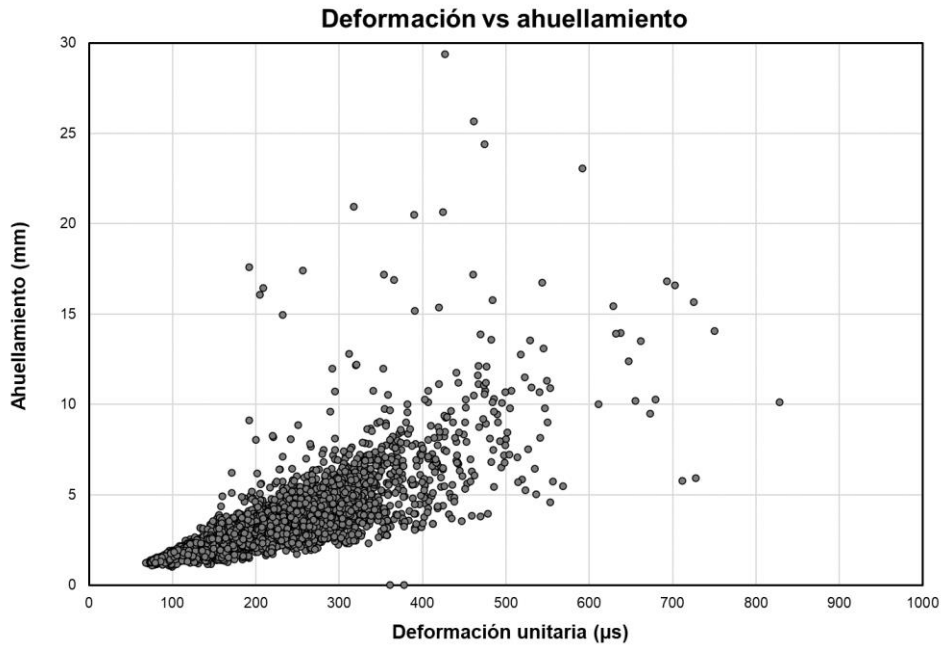


Figura D1-29

Relación ahuellamiento en la subbase vs deformación unitaria a compresión en la subbase

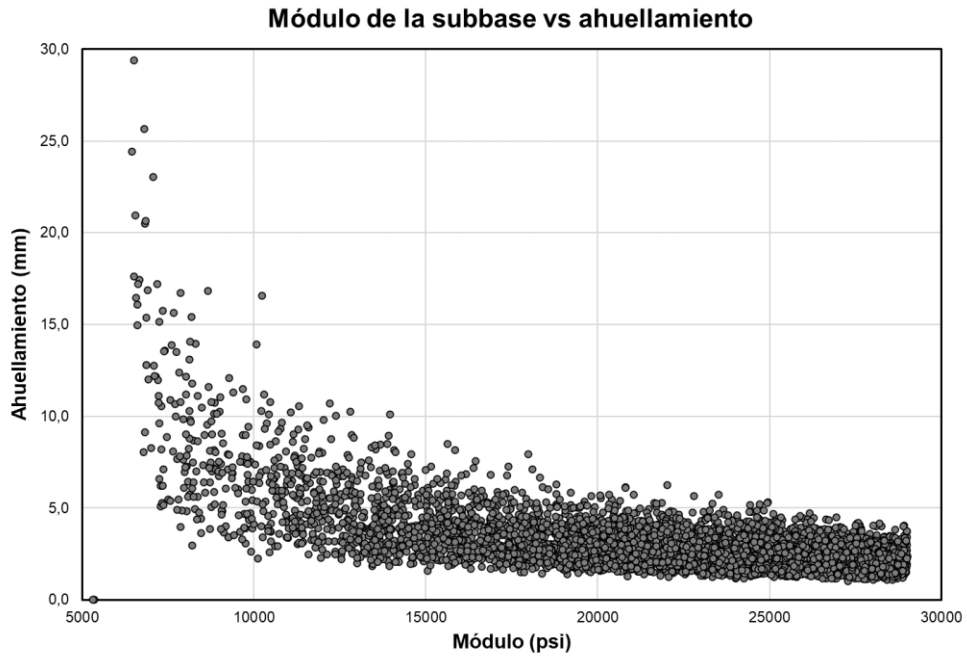


Figura D1-30

Relación ahuellamiento en la subbase vs módulo resiliente en la subbase

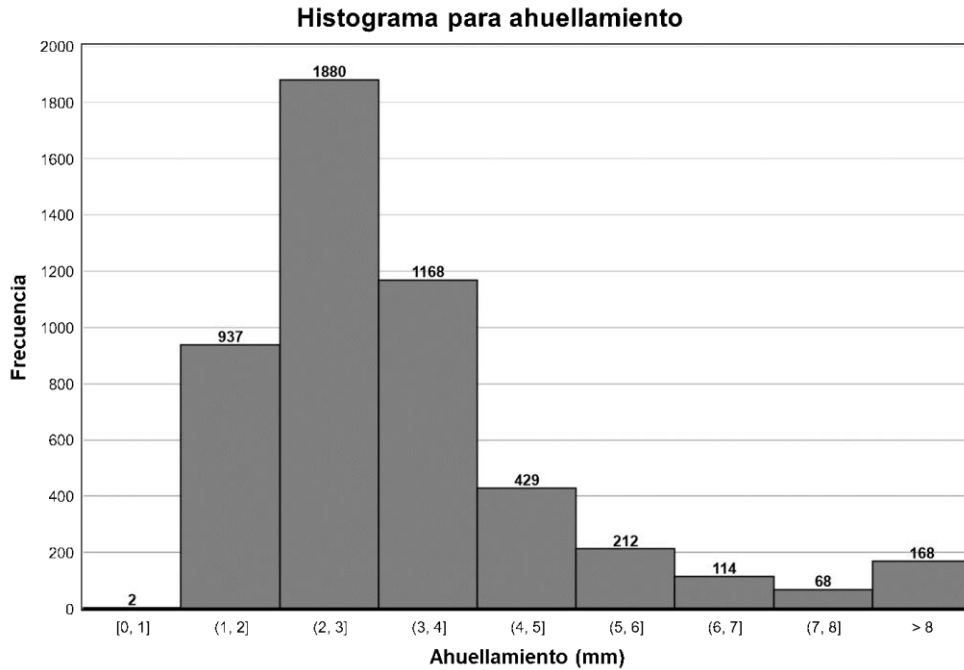


Figura D1-31

Histograma ahuellamiento en la subbase para 15 millones de ESAL

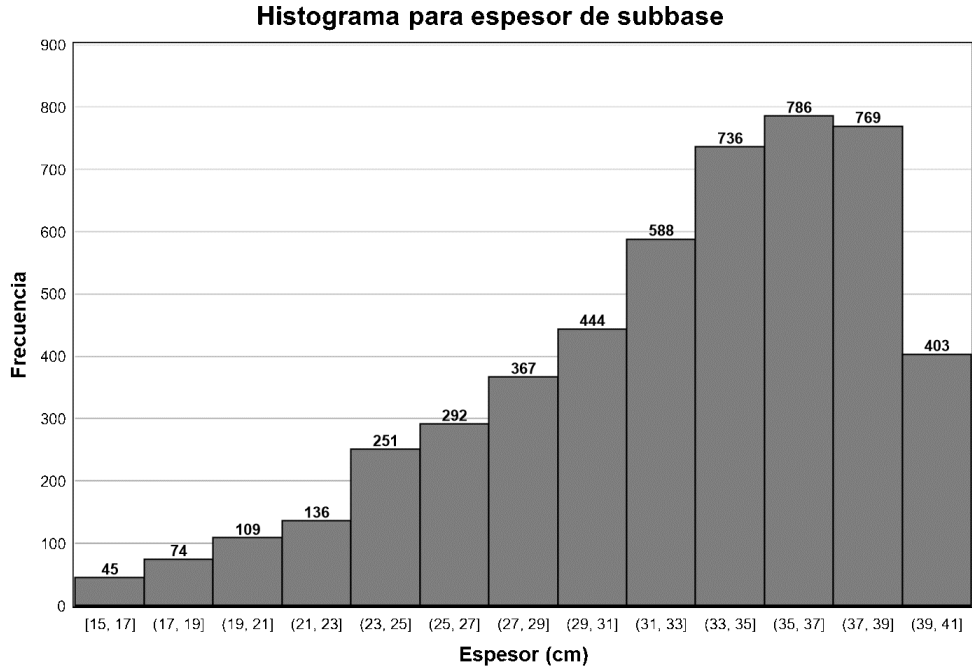


Figura D1-32

Histograma distribución de espesores de subbase

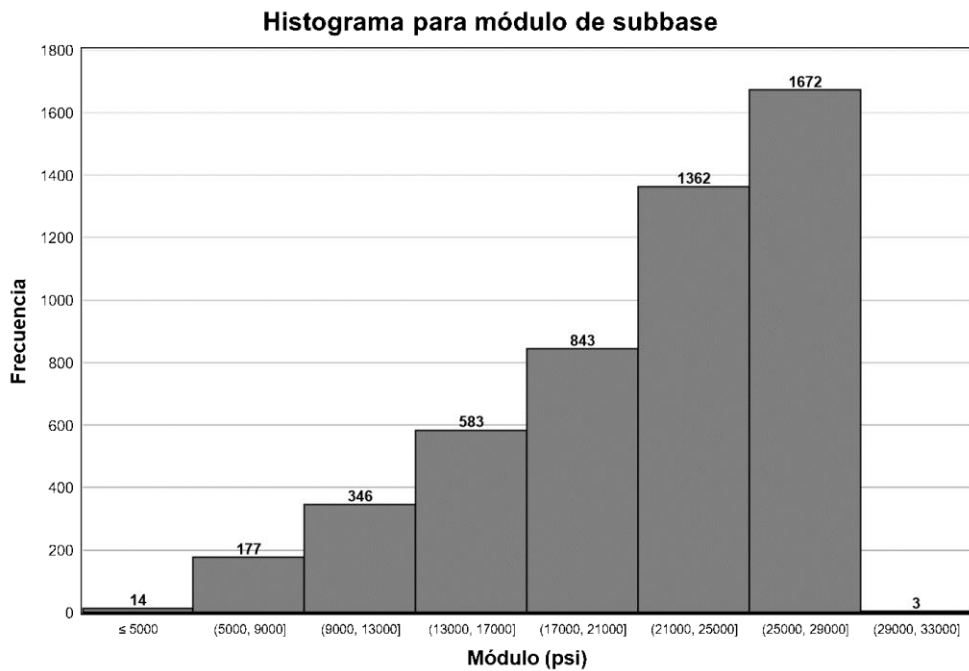


Figura D1-33

Histograma distribución de módulos resilientes de la subbase

D.1.06 *Análisis de sensibilidad para ahuellamiento en la subrasante*



Figura D1-34

Relación ahuellamiento en la subrasante vs deformación unitaria a compresión en la fibra superior de la subrasante

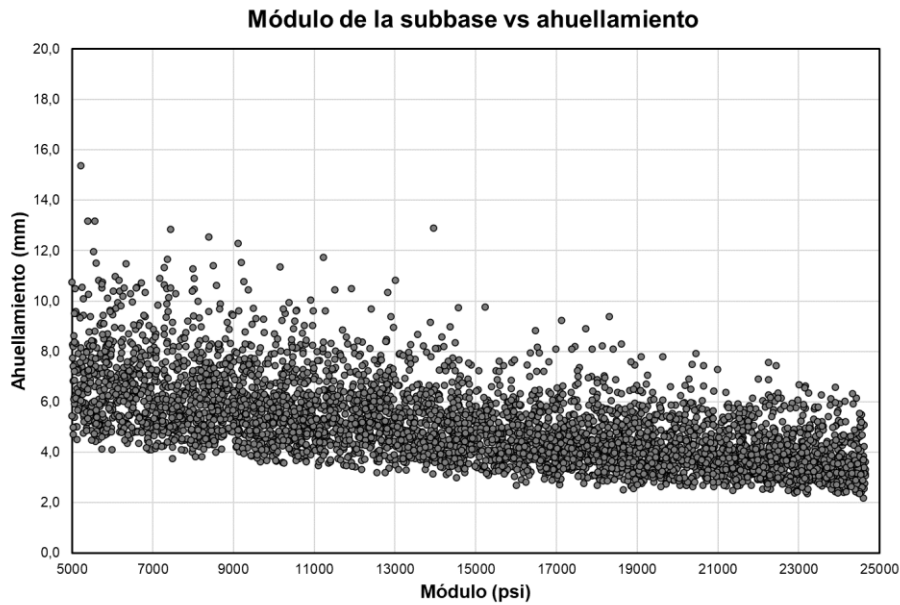


Figura D1-35

Relación ahuellamiento en la subrasante vs módulo resiliente en la subrasante, para 15 millones de ESAL's

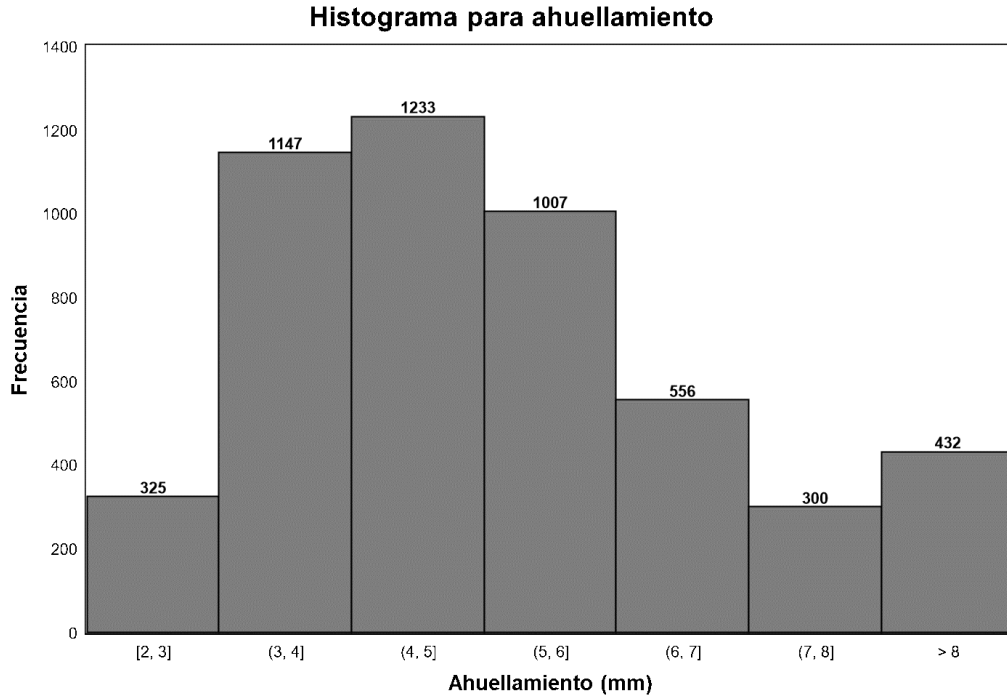


Figura D1-36

Histograma ahuellamiento en la subrasante para 15 millones de ESAL

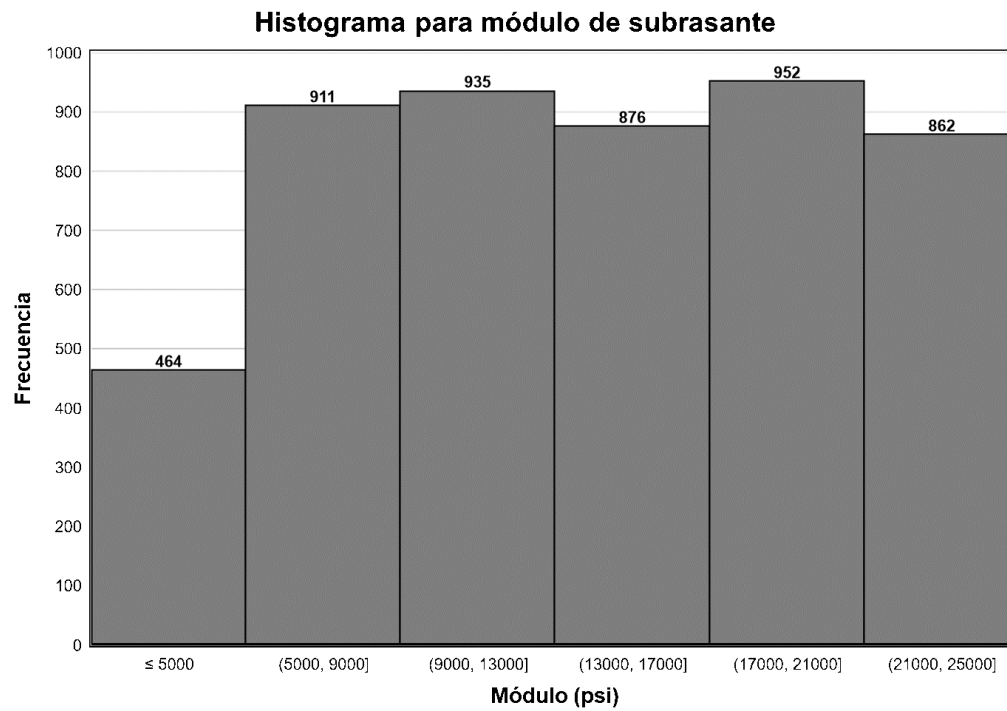


Figura D1-37

Histograma distribución de módulos resilientes de la subrasante

Anexo D.2 Comparación de predicciones de modelos de ahuellamiento de materiales nacionales vs el modelo de la AASHTOWare ME

Se realizaron 70 modelaciones para verificar y comparar el modelo de la AASHTOWare ME para el ahuellamiento de materiales granulares respecto a modelos nacionales.

Modelos Nacionales

- Material 1 (M1)
- Material 2 (M2)

Donde,

N = repeticiones de carga.

σ_d = esfuerzo desviador.

σ_3 = esfuerzo de confinamiento.

Tabla D2-01

Valores utilizados para las modelaciones

Valores para obtener datos				
	Base Granular	MAC	Subbase	Subrasante
Módulo (psi)	35000	Variable	15000	8000
Poisson	0,4	0,35	0,4	0,45
Espesor (cm)	25	Variable	30	-

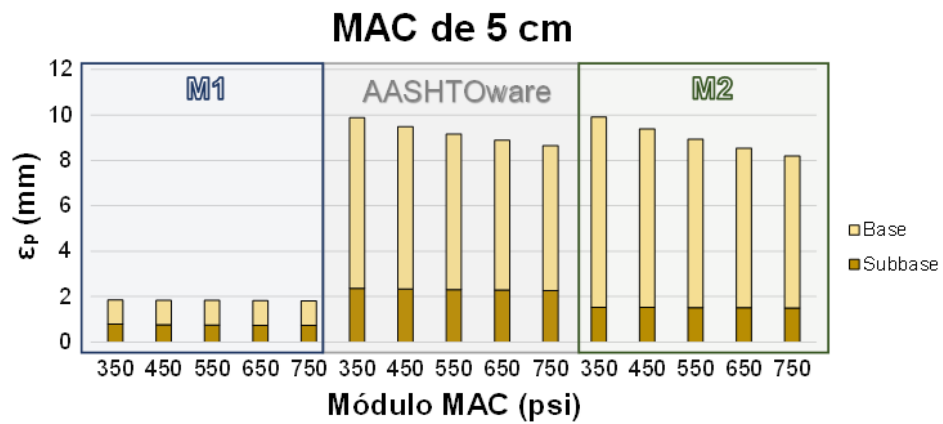
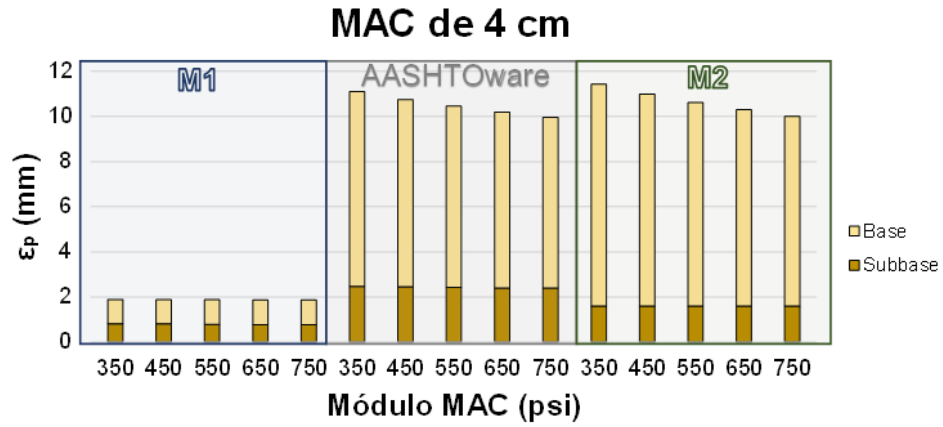


Figura D2-01

Ahuellamiento acumulado MAC delgada (diferentes espesores) para 200 000 ciclos

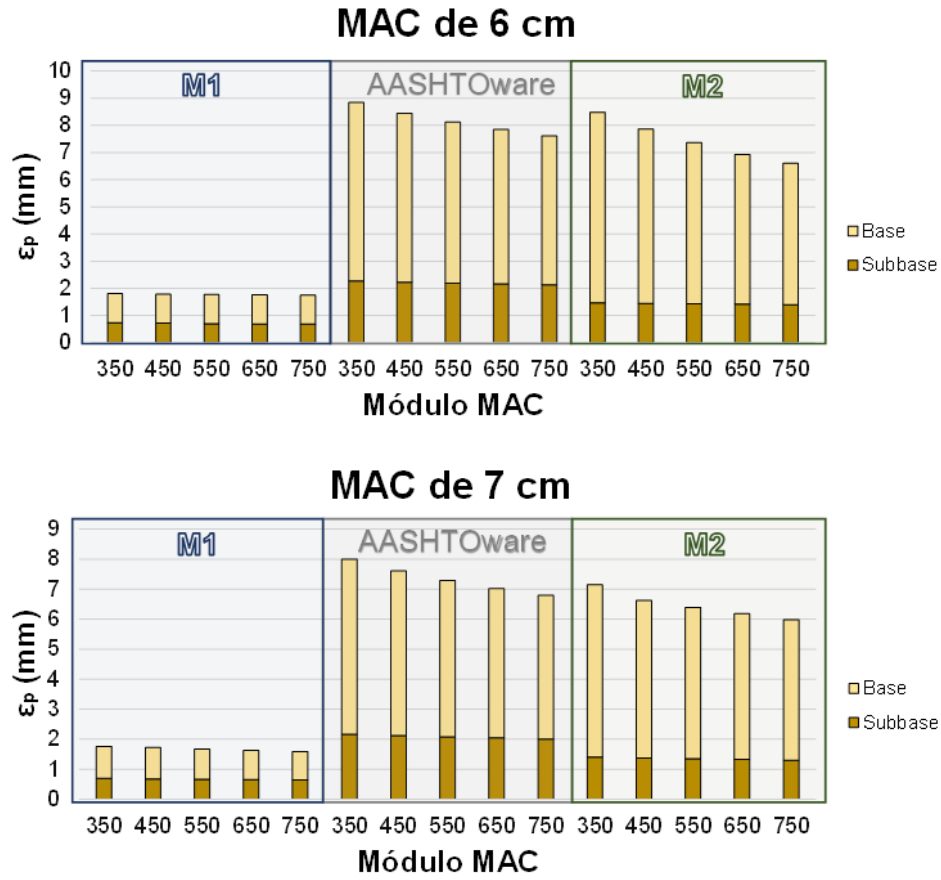


Figura D2-02

Ahuellamiento acumulado MAC delgada (diferentes espesores) para 200 000 ciclos

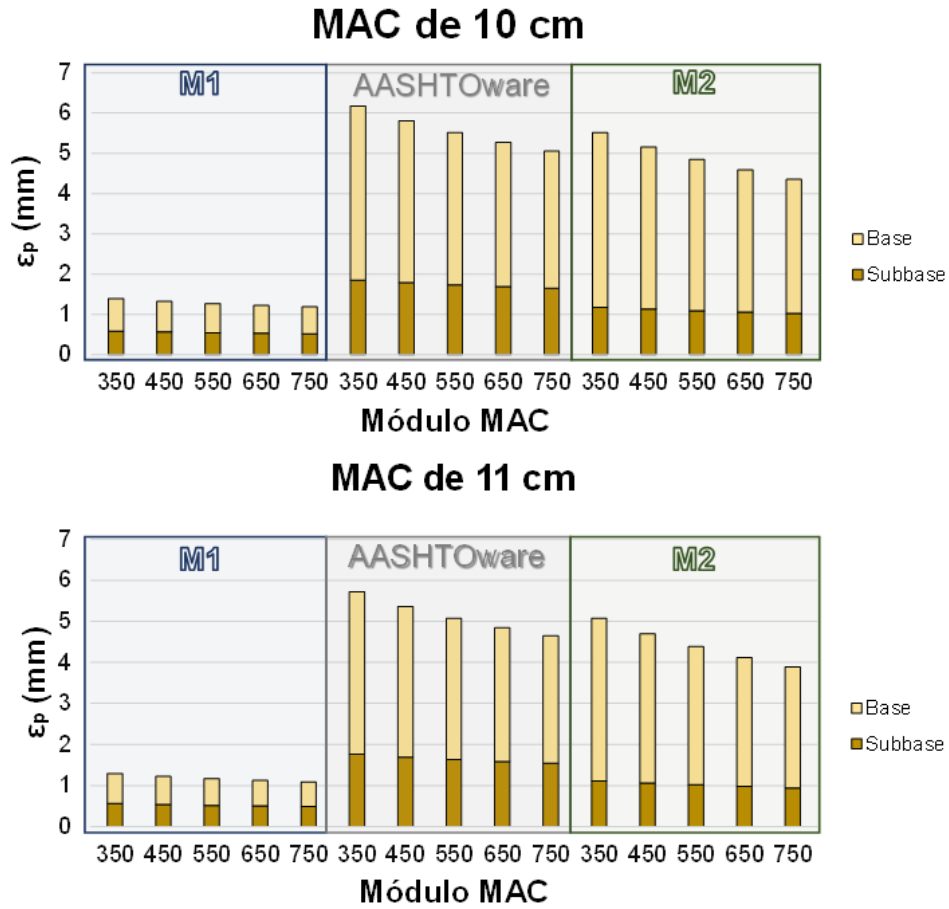


Figura D2-03

Ahuellamiento acumulado MAC gruesa (diferentes espesores) para 200 000 ciclos

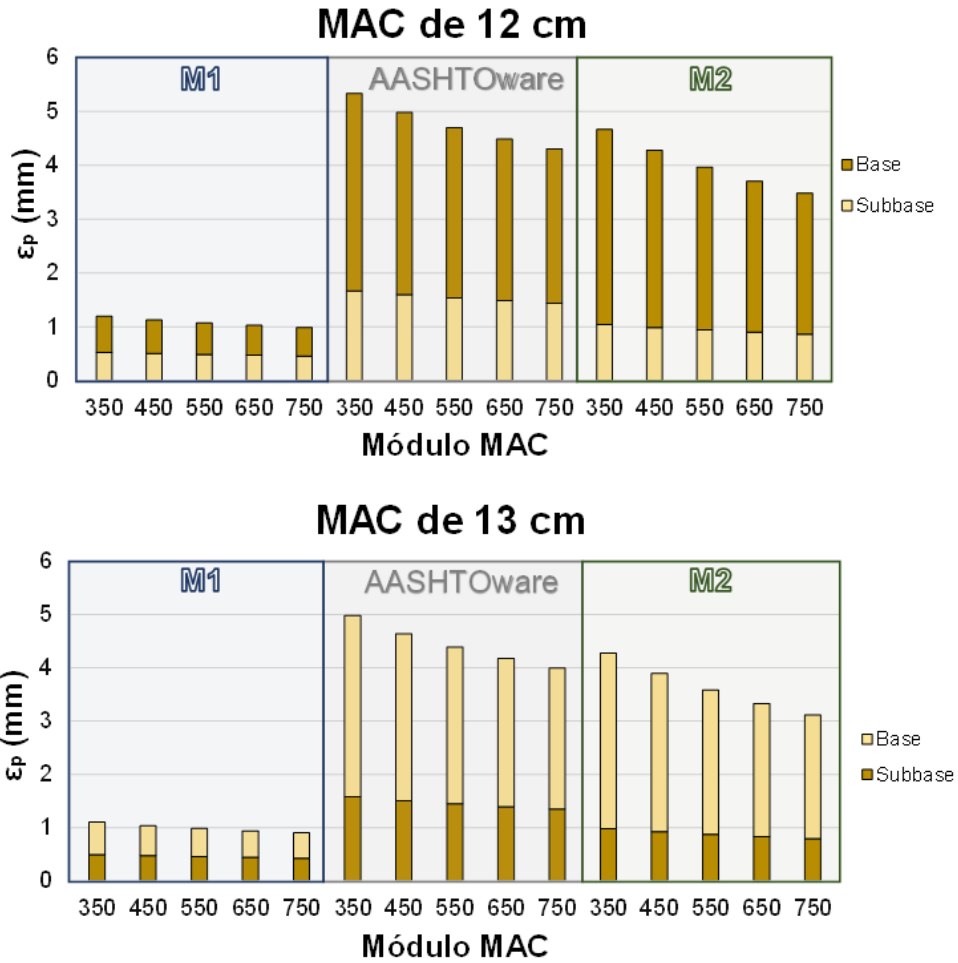


Figura D2-04

Ahuellamiento acumulado MAC gruesa (diferentes espesores) para 200 000 ciclos

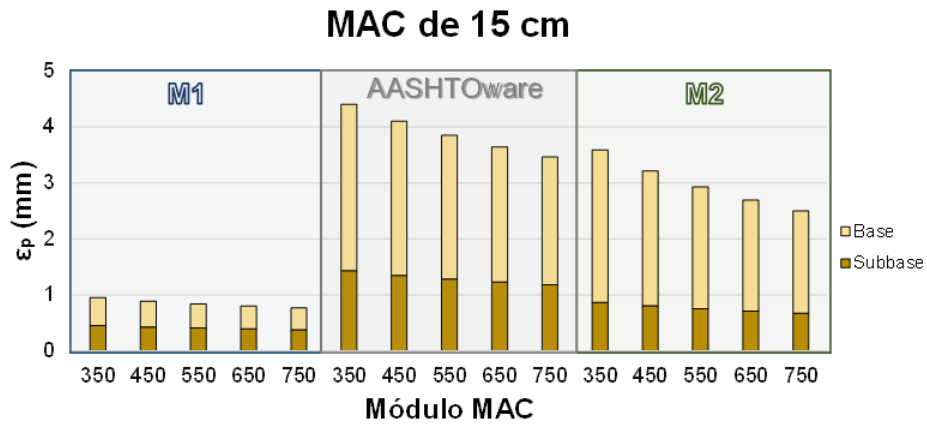
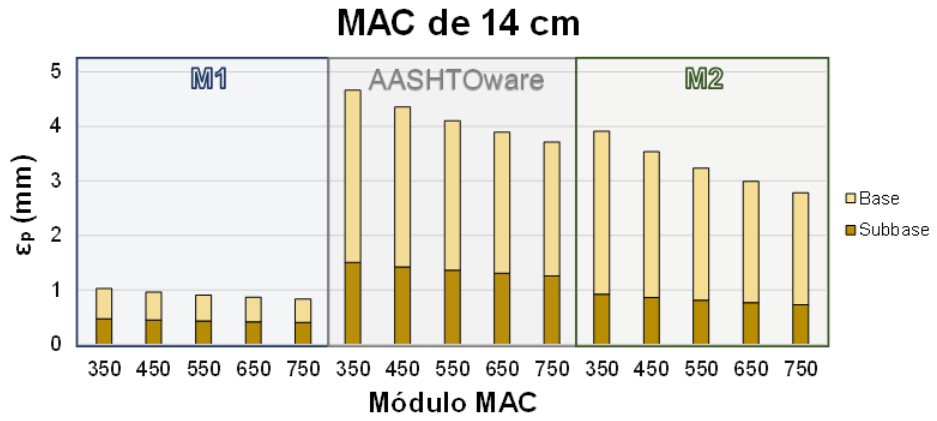


Figura D2-05

Ahuellamiento acumulado MAC gruesa (diferentes espesores) para 200 000 ciclos

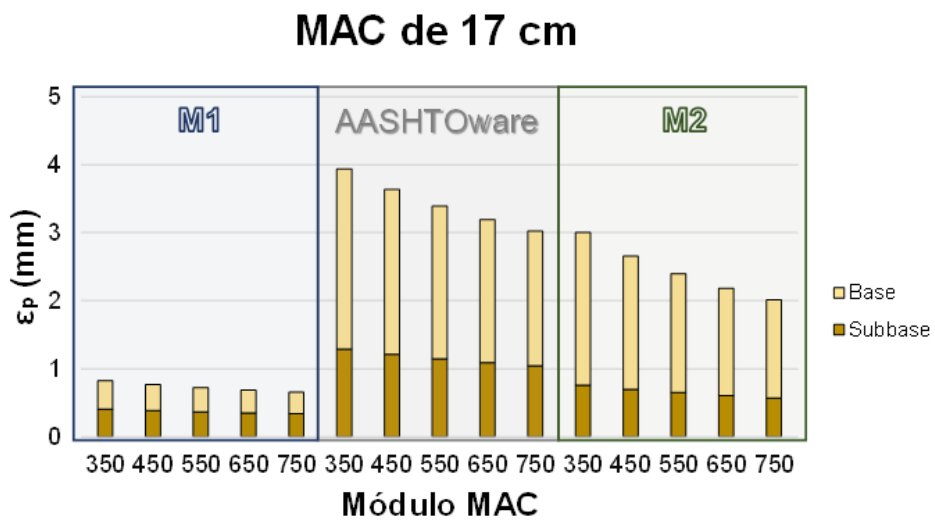
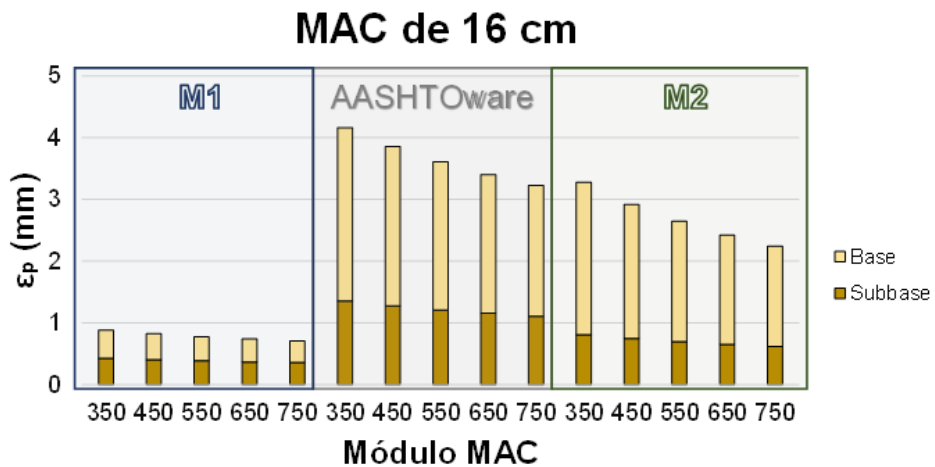


Figura D2-06

Ahuellamiento acumulado MAC gruesa (diferentes espesores) para 200 000 ciclos

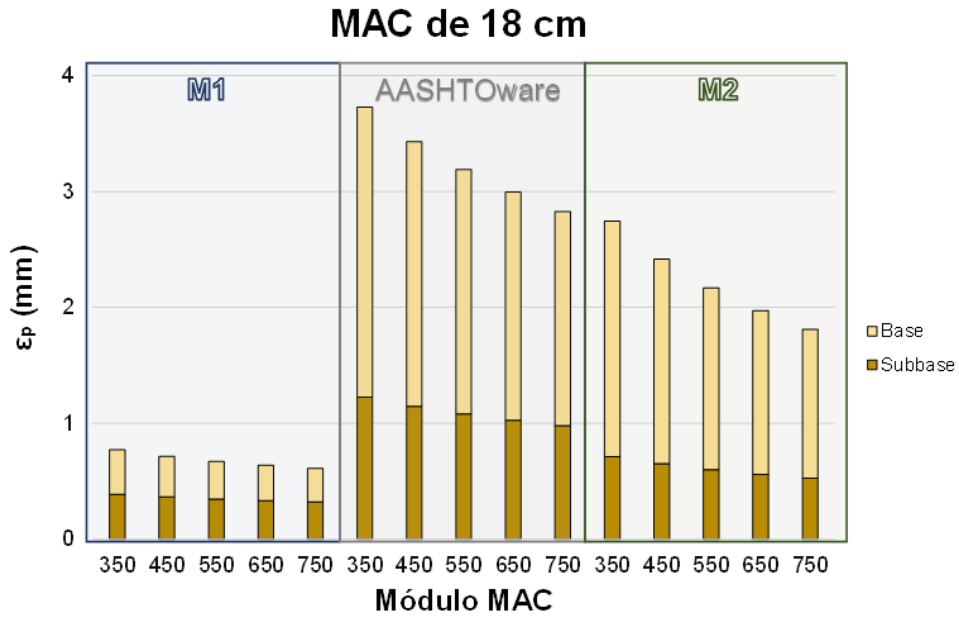


Figura D2-07

Ahuellamiento acumulado MAC gruesa (diferentes espesores) para 200 000 ciclos

ANEXO E RECOMENDACIONES GENERALES

Anexos E.1 Problemas en suelos

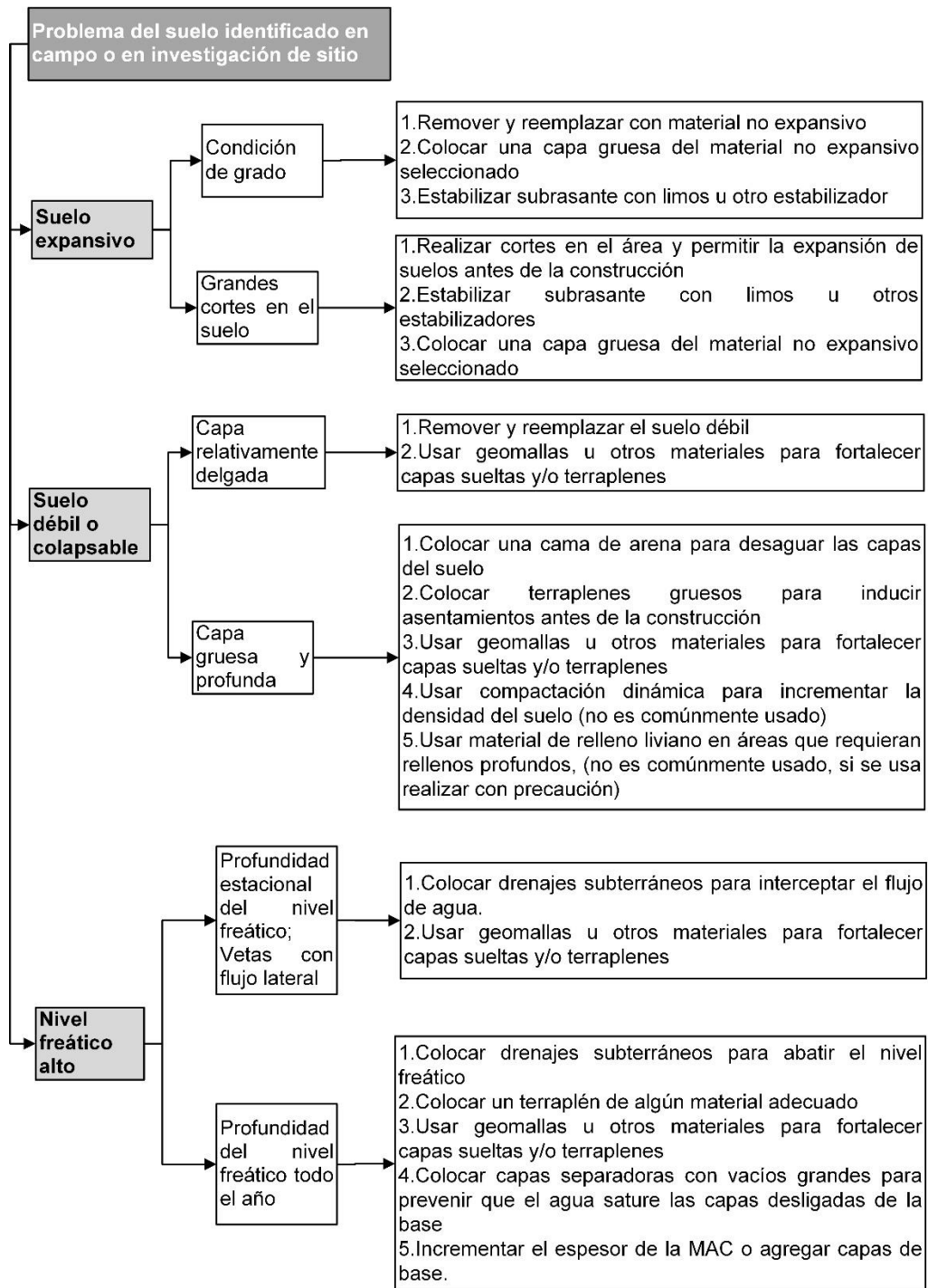


Figura E1-01

Recomendaciones generales para problemas en suelos

Fuente. AASHTO, 2015.

Anexos E.2 Recomendaciones para el diseño ME

Tabla E2-01

Recomendaciones para el diseño

Daño e IRI	Revisiones en el diseño para minimizar o eliminar el daño
Cuero de lagarto	<ul style="list-style-type: none"> ● Incrementar el espesor de la capa asfáltica. ● Para capas asfálticas gruesas (> 5 in), aumentar el módulo dinámico. ● Para capas delgadas (< 3 in) reducir módulo dinámico. ● Revisar el diseño de mezcla de la capa asfáltica (incrementar el porcentaje del agregado triturado, usar finos manufacturados, incrementar el contenido de asfalto, usar asfalto más rígido, pero asegurar el mismo nivel de compactación a lo largo de la vía, usar asfalto modificado con polímeros, entre otros). ● Incrementar la densidad reduciendo el espacio de vacíos de la mezcla asfáltica. ● Incrementar el módulo resiliente de los agregados de la base (incrementar densidad, reducir plasticidad, reducir la cantidad de finos, entre otros).
Ahuellamiento (mezcla asfáltica caliente)	<ul style="list-style-type: none"> ● Aumentar el módulo dinámico de las capas. ● Usar asfalto modificado con polímeros en las capas cercanas a la superficie. ● Aumentar la cantidad de agregado triturado. ● Incrementar la cantidad de finos manufacturados en la mezcla. ● Reducir el contenido de asfalto en las capas de mezcla asfáltica.
Ahuellamiento en capas desligadas y subrasante	<ul style="list-style-type: none"> ● Aumentar el módulo resiliente de la base granular, incrementar la densidad de la base granular. ● Estabilizar la parte superior de la capa de fundación, usar capas gruesas de material granular. ● Colocar una capa de material de relleno con compactación adecuada. ● Incrementar el grosor de la carpeta asfáltica.
Agrietamiento longitudinal por fatiga (iniciado en la superficie)	<p>El daño acumulado y la función de transferencia de las grietas longitudinales deben ser usadas con cuidado al tomar decisiones acordes a la idoneidad de un diseño de prueba, en términos de agrietamiento longitudinal (agrietamiento de arriba hacia abajo)</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Reducir el módulo dinámico de la superficie de la mezcla asfáltica. ● Incrementar el espesor de la carpeta asfáltica. ● Usar un ligante asfáltico de menor viscosidad en la capa superficial. ● Usar asfalto modificado con polímeros en la capa superficial.

Adaptado de: MAV-2016.



MINISTERIO DE
OBRAS PÚBLICAS
Y TRANSPORTES

GOBIERNO
DE COSTA RICA

VOLUMEN 4

GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS
PARA COSTA RICA

GDP-2024

TOMO I

GUÍA MECANÍSTICA EMPÍRICA
PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS
FLEXIBLES Y SEMIRRÍGIDOS



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

LanammeUCR

Laboratorio Nacional de
Materiales y Modelos Estructurales

2024