

BOLETÍN TÉCNICO

PITRA-LanammeUCR

Volumen 12, N.º 8, Noviembre 2021

Guía simplificada para el diseño de pavimentos de bajo volumen de tránsito (GBV), Tomo II de la Guía de diseño estructural de pavimentos de Costa Rica (GDP-2020)

Eliécer Arias Barrantes, M.Sc.,

✉ eliecer.arias@ucr.ac.cr

Investigador, Unidad de Investigación en Infraestructura y Transporte (UIIT)

Gianluca Corazzari Herrera

✉ gianluca.corazzari@ucr.ac.cr

Investigador, Unidad de Investigación en Infraestructura y Transporte (UIIT)

1. Introducción

El diseño de pavimentos es un tema muy amplio, involucra muchos aspectos de carácter científico y práctico. Es por este motivo que, alrededor del mundo, se han invertido muchos recursos en proyectos de investigación con el propósito de lograr que las estructuras de pavimento sean duraderas para condiciones específicas de tráfico y clima.

Debido a que las solicitudes de carga varían significativamente de una ruta a otra es común que, para simplificar los procesos, se generen procedimientos y guías de diseño enfocadas a rutas con volúmenes de tránsito específicos. Muchas guías internacionales presentan este tipo de propuestas donde, a partir de requisitos bien definidos y para condiciones preestablecidas, es posible contar con distintos paquetes estructurales que pueden satisfacer cierta demanda vehicular.

El proyecto desarrollado comprende una propuesta, para la implementación de una Guía de diseño simplificado de pavimentos flexibles y semirrígidos para caminos con bajos volúmenes de tránsito (en adelante GBV), que constituye el Tomo II de la Guía de diseño estructural de pavimentos de Costa Rica (GDP-2020), la cual actualmente se encuentra en el proceso final de revisión de previo a trasladarla al MOPT para el respectivo trámite de oficialización. La estimación de las diferentes variables utilizadas para el diseño de las estructuras de pavimento se realizó con base en datos recolectados entre el 2008 y el 2014 por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR).

Esta guía presenta un catálogo de diseño con distintos tipos de estructuras de pavimento para determinada su vida útil, que depende del tránsito promedio diario, del porcentaje de vehículos pesados y de la capacidad soportante de la subrasante. Estas estructuras de pavimento cumplen con criterios mínimos de desempeño funcional y estructural, buscando mantener los estándares de calidad adecuados sin tener que realizar un diseño detallado de la estructura, permitiendo así un ahorro de recursos para los distintos entes que necesiten construir una vía de bajo volumen.

2. Contenido de la GBV Tomo II

Estructura de la guía

La GBV cuenta con 3 capítulos principales:

- Capítulo I: Requerimientos previos de diseño
- Capítulo II: Diseño estructural
- Capítulo III: Selección de la estructura de pavimento

En el Capítulo I, se incluyen los aspectos requeridos para que el diseñador pueda obtener la información requerida para utilizar el método de forma correcta y se desarrollan temas como:

- Recomendaciones para estimación de tráfico
- Ensayos de laboratorio recomendados
- Especificaciones mínimas de materiales
- Frecuencia y análisis en subrasantes

El Capítulo II presenta cada una de las variables requeridas, matrices de decisión, categorías y rangos para utilizar el método y se detallan las estructuras de pavimento diseñadas con su respectivo rango de trabajo en ejes equivalentes de diseño (ESAL), siendo el parámetro crítico el valor mínimo entre el análisis de fatiga de la mezcla asfáltica, base estabilizada con cemento o ahuellamiento total acumulado.

En el Capítulo III se muestra el catálogo de estructuras desarrollado y las consideraciones finales. Como complemento a la guía, se ha desarrollado un software llamado "GBV 2020" (Guía Bajo Volumen 2020) que actualmente se encuentra en fase de pruebas, el cual funciona como recopilador de la información, verificador de requisitos, selector de estructuras funcionales y generador de reportes resumen.

Propuesta de diseño

La estructura principal puede consultarse en el informe "Propuesta para una guía de diseño de bajo volumen para pavimentos flexibles y semirrígidos. LM-PI-GM-INF-05-16" (Arias, 2016), donde fue necesario analizar las variables que tenían más peso dentro del diseño, analizar datos de Costa Rica y definir condiciones que permitieran recomendar un diseño simplificado de pavimentos. Lo anterior, con el propósito de mantener una rigurosidad técnica y simplificar el proceso de encontrar una estructura de pavimento adecuada, pero manteniendo aspectos básicos del diseño moderno de pavimentos, como el concepto de módulo dinámico de mezclas asfálticas, módulo resiliente variable por confinamiento y estado de esfuerzos en capas granulares, modelación bajo el concepto de multicapa elástica y una revisión por desempeño utilizando modelos de deterioro (ahuellamiento en la mezcla asfáltica, base y subbase granular y subrasante) y umbrales adecuados a este tipo de rutas a diseñar. En la Figura 1 se muestran los pasos seguidos para el desarrollo de la propuesta.

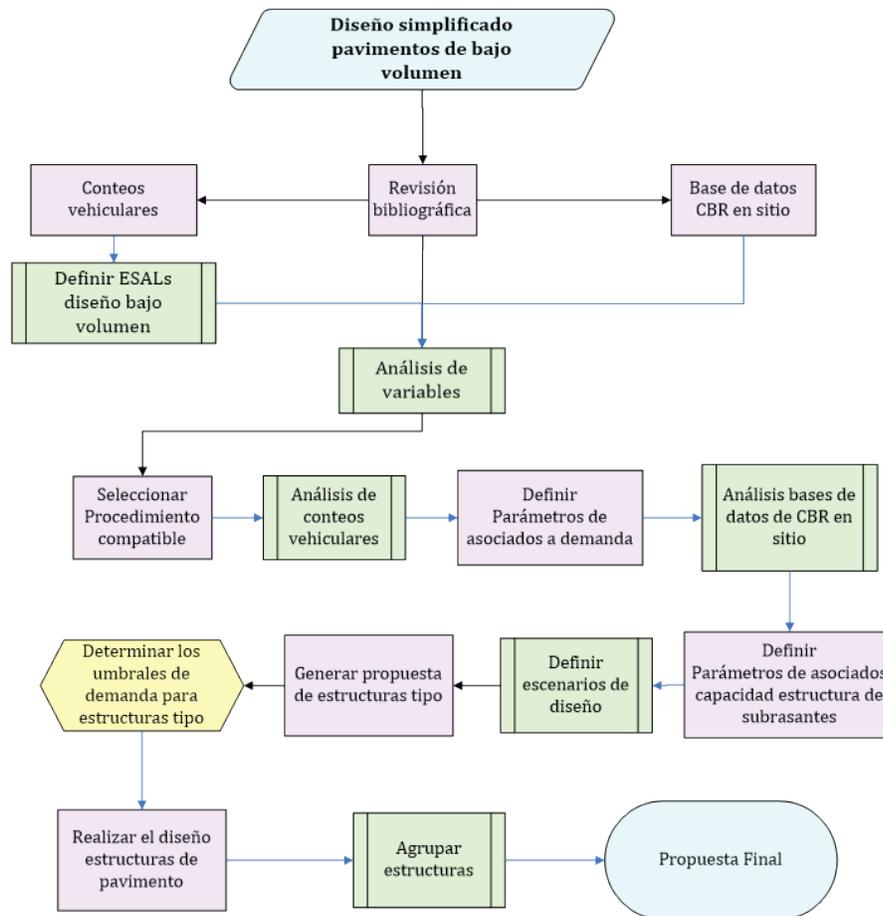


Figura 1. Desarrollo de propuesta para la GBV

El método desarrollado puede ser utilizado en carreteras de bajo volumen de tráfico, donde se ha definido un límite de 1,5 millones de ejes equivalentes (Arias, 2016); es aplicable tanto en vías nacionales como cantonales, siempre y cuando se cumplan los principios básicos y se cuente con las variables disponibles las cuales están asociadas a: período de diseño en años, tráfico vehicular (TPDA), porcentaje de vehículos pesados y CBR (Índice de soporte de California, por sus siglas en inglés) de la subrasante obtenido en laboratorio y verificado en sitio. Con estas variables se determinó una demanda a cumplir por parte de las estructuras analizadas.

El método empleado consistió en definir posibles estructuras con base a diseños con la metodología de la AASHTO de 1993 para cada condición, definir estructuras “tipo” a revisar y utilizar el procedimiento de diseño mecánico empírico con modelos de desempeño calibrados para Costa Rica, para verificar el cumplimiento de las estructuras con un máximo de ahuellamiento de 12 mm y un porcentaje área agrietada del 50 %.

El trabajo acá expuesto es el resumen de 450 modelaciones por medio de la metodología de multicapa elástica, verificaciones por desempeño a fatiga para mezcla asfáltica, bases estabilizadas y ahuellamiento en las capas inferiores, para 15 estructuras de pavimento diferentes y para las condiciones de subrasantes consideradas, dando como resultado ocho estructuras que podrían cumplir con diferentes condiciones de demanda. Este catálogo de estructuras se presenta como una alternativa de diseño simple y viable para rutas de baja demanda. La propuesta completa puede consultarse en el LM-PI-UMP-103-R1 (Arias, 2019).

En la Figura 2, es posible observar uno de los árboles de decisión que permiten estimar la demanda en ejes equivalentes de diseño que debe cumplir una estructura en particular para poder satisfacer la demanda para una capacidad mecánica de una subrasante determinada.

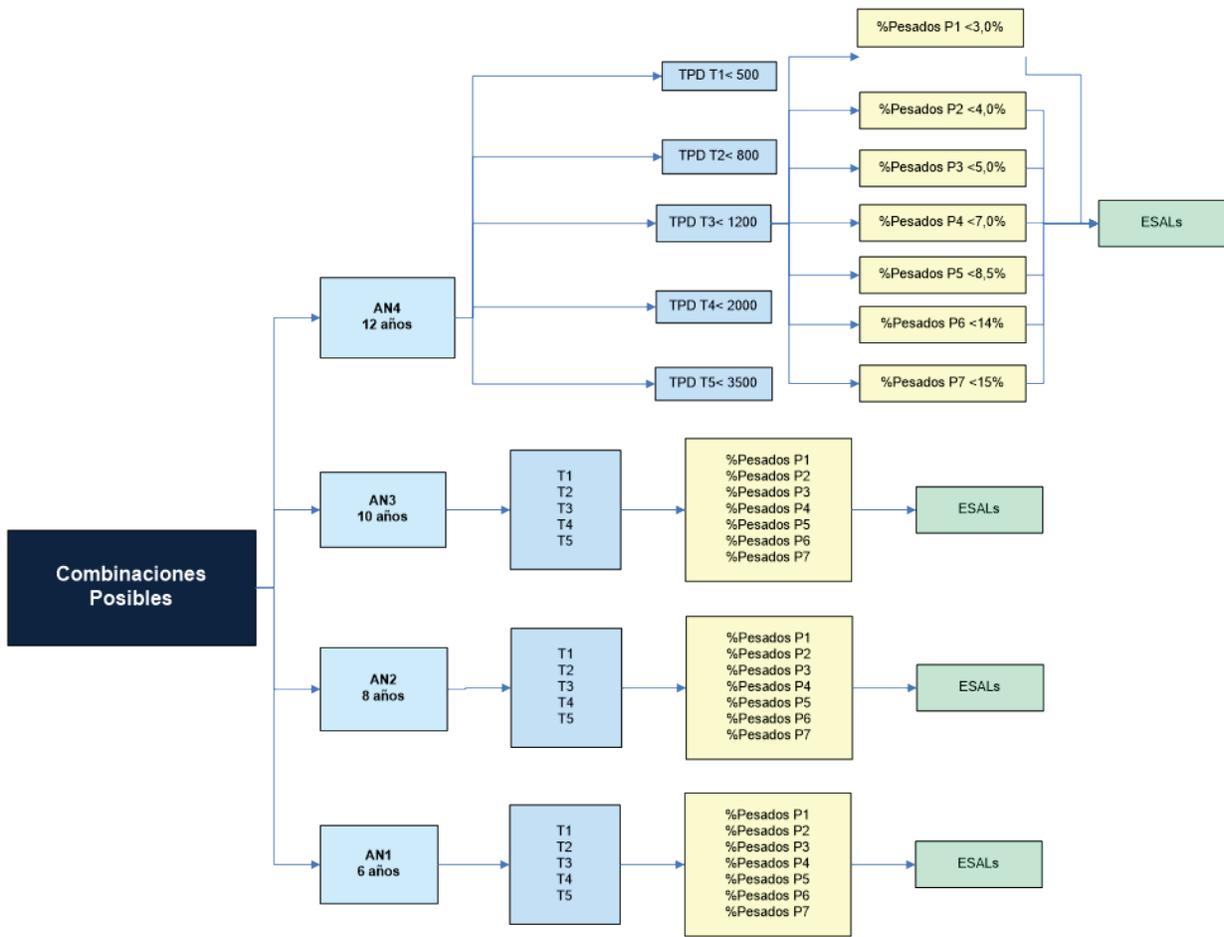


Figura 2. Combinaciones determinadas para estimar la demanda de en la GBV

En el flujograma de la Figura 3 se muestran las variables utilizadas para la selección de estructuras adecuadas con base en tránsito vehicular (TPDA), porcentaje de vehículos pesados y un período de diseño seleccionado; con estas variables se determina la demanda y con CBR de la subrasante se determina la capacidad disponible.

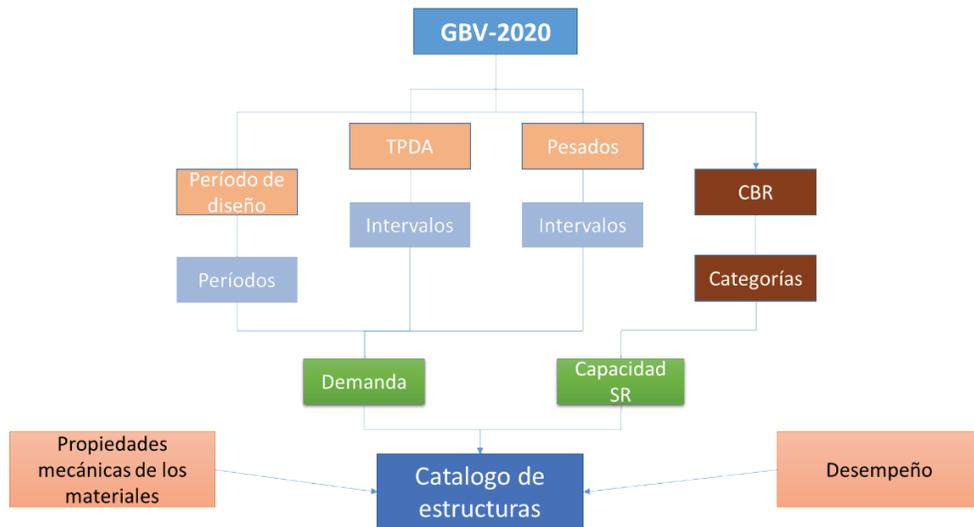


Figura 3. Variables consideradas para utilizar el software o el catálogo de estructuras

Categorías:

Para algunas variables de diseño se establecen distintas clasificaciones, de manera que los diseños propuestos puedan cumplir con varias combinaciones de dichas categorías.

Tránsito promedio diario (TPD)

Se establecen cinco clasificaciones (Cuadro 1) para el TPD, basadas en mediciones realizadas por la Unidad de Gestión Municipal del LanammeUCR. Las categorías corresponden a los percentiles 15, 25, 35, 50 y 75 de un total de 291 mediciones. Para las verificaciones mecanístico-empíricas se utilizan los límites superiores de cada categoría TPD.

Cuadro 1. Clasificaciones para TPD

Clasificación	TPD (vehículos por día)
T ₅₀₀	Menos de 500
T ₈₀₀	Entre 501 y 800
T ₁₂₀₀	Entre 801 y 1200
T ₂₀₀₀	Entre 1201 y 2000
T ₃₅₀₀	Entre 2001 y 3500

CBR de la subrasante

Igual que con el TPD, los rangos para el CBR (Cuadro 2) de la subrasante se elaboraron con base en datos recolectados por la Unidad de Gestión Municipal del PITRA-LanammeUCR. Los rangos se seleccionaron mediante un análisis estadístico y utilizando los percentiles representativos para los valores de CBR. Para las verificaciones mecanístico-empíricas se utilizan los límites inferiores de cada categoría de CBR.

Cuadro 2. Clasificaciones para CBR

Clasificación	Índice de soporte de California (CBR)
CBR _{3%}	Entre 3,00 % y 3,99 %
CBR _{4%}	Entre 4,00 % y 5,99 %
CBR _{6%}	Entre 6,00 % y 8,99 %
CBR _{9%}	Entre 9,00 % y 10,99 %
CBR _{11%}	Mayor al 11,00%

En el Cuadro 2 se observa que el valor mínimo de CBR es del 3%; sin embargo, cerca de un 24% de los datos de CBR utilizados para la elaboración de la guía de diseño de bajo volumen correspondían a índices de soporte menores al 3%. Esto se debe a que, aunque la guía de bajo volumen busca ofrecer diseños para vías con bajas exigencias de tránsito, se considera que magnitudes tan bajas de CBR no son aptas para la construcción de una estructura de pavimento y para escenarios que no cumplan esta condición es necesario seguir un procedimiento de mejoramiento o de sustitución de la subrasante existente.

Porcentaje de vehículos pesados

Para el porcentaje de vehículos pesados se definieron siete categorías, utilizando los mismos conteos vehiculares de la Unidad de Gestión Municipal del PITRA-LanammeUCR y se refieren a la proporción del TPD que está constituido por vehículos pesados. Para las verificaciones mecanístico-empíricas se utilizan los límites superiores de cada categoría. Las categorías se muestran en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Clasificaciones para porcentaje de pesados

Clasificación	Porcentaje de vehículos pesados (%)
P _{3%}	Menor al 3,00 %
P _{4%}	Entre 3,01 % a 4,00 %
P _{5%}	Entre 4,01 % y 5,00 %
P _{7%}	Entre 5,01 % y 7,00 %
P _{8%}	Entre 7,01 % y 8,50 %
P _{14%}	Entre 8,51 % y 14,00 %
P _{15%}	Entre 14,01 % y 15,00 %

Ejes simples equivalentes de carga (ESALs)

A partir de las distintas combinaciones de categorías de tránsito promedio diario y porcentaje de vehículos, se definen matrices de ESALs para periodos de diseño de 6 a 12 años. Sin embargo, se recomienda mantener periodos de diseño mayores o iguales a 8 años, siempre tomando en consideración la importancia y clasificación de la ruta.

En el Cuadro 4 se muestran dos matrices de ESALs, para periodos de diseño de 6 y 10 años. Es importante destacar que, aunque la guía de diseño incluye múltiples clasificaciones de tránsito y porcentaje de pesados, la combinación de algunas de estas genera ESALs superiores a 1,5 millones que escapan del alcance de la guía. Los casos en que las combinaciones de TPD y porcentaje de pesados superan el límite establecido para la guía se muestran resaltados en rojo en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Matrices de ESALs para un periodo de diseño de 6 años y 10 años.

Período de diseño = 6 Años							Período de diseño = 10 Años						
Pesados	Tránsito promedio diario						Pesados	Tránsito promedio diario					
	T ₅₀₀	T ₈₀₀	T ₁₂₀₀	T ₂₀₀₀	T ₃₅₀₀	T _{>3500}		T ₅₀₀	T ₈₀₀	T ₁₂₀₀	T ₂₀₀₀	T ₃₅₀₀	T _{>3500}
P _{3%}	61587	98539	147809	246348	431109	615870	P _{3%}	111476	178362	267543	445905	780334	1114763
P _{4%}	82116	131386	197078	328464	574812	821160	P _{4%}	148635	237816	356724	594540	1040446	1486351
P _{5%}	102645	164232	246348	410580	718515	1026449	P _{5%}	185794	297270	445905	743176	1300557	1857939
P _{7%}	143703	229925	344887	574812	1005920	1437029	P _{7%}	260111	416178	624267	1040446	1820780	2601114
P _{8%}	174496	279194	418791	697986	1221475	1744964	P _{8%}	315850	505359	758039	1263398	2210947	3158496
P _{14%}	287406	459849	689774	1149623	2011841	2874058	P _{14%}	520223	832357	1248535	2080891	3641560	5202229
P _{15%}	307935	492696	739044	1231739	2155544	3079348	P _{15%}	557382	891811	1337716	2229527	3901671	5573816

Material

Módulo dinámico de la mezcla asfáltica

Para definir el módulo dinámico de la mezcla asfáltica en caliente (MAC), utilizado en los diseños de la GBV se analizaron dos mezclas asfálticas de distintas plantas de Costa Rica. Debido a las características viscoelásticas de la MAC, también se estudió la temperatura del pavimento y la frecuencia de carga, para finalmente definir el módulo dinámico de material.

La temperatura del pavimento se obtuvo analizando temperaturas promedio mensuales de aire en 13 zonas del país, utilizando datos provenientes de las estaciones del Instituto Meteorológico Nacional (IMN). A partir de los datos del IMN y utilizando modelos del Programa estratégico de investigación en carreteras (SHRP, por sus siglas en inglés), Desempeño de pavimentos a largo plazo (LTPP, por sus siglas en inglés), Instituto del Asfalto y Witczak (1992), se obtuvieron las temperaturas promedio del pavimento para cada zona analizada.

La frecuencia de carga se obtuvo mediante el modelo propuesto por Barksdale (1971) y, asumiendo una velocidad de tránsito vehicular de 60 km/h, se obtuvo una frecuencia de carga de 36,2 Hz. A partir de la temperatura del pavimento y la frecuencia de carga, se obtiene un módulo dinámico de diseño de la MAC de 1924 MPa (279 ksi).

3. Requisitos de diseño

Para utilizar la Guía de diseño simplificado para pavimentos de bajo volumen y, por consiguiente, para utilizar el software de diseño simplificado, el proyecto en cuestión debe cumplir con ciertos requisitos de diseño. El cumplimiento de estos requisitos garantiza que el proyecto pueda clasificarse como de bajo volumen y que los diseños que proporciona la guía sean lo suficientemente robustos para satisfacer las necesidades específicas del proyecto.

La GBV especifica valores mínimos o máximos relacionados con el tránsito, materiales e hidrología de la vía. Es responsabilidad del diseñador elegir procedimientos adecuados, para verificar el cumplimiento de las especificaciones que indica la guía de diseño simplificado.

En el Cuadro 5 se detallan las especificaciones máximas o mínimas que se deben cumplir para aplicar la GBV. Para comprobar la aptitud de los materiales, se debe verificar su cumplimiento respecto a las especificaciones del Manual de especificaciones para la construcción de carreteras, caminos y puentes (CR-2010 o su versión vigente).

Cuadro 5. Requisitos de diseño

Variable de diseño	Valor
TPD (tránsito promedio diario)	Máx. 3500
CBR de la subrasante	Mín. 3,0 %
Porcentaje de vehículos pesados	Máx. 15,0 %
ESALs	Máx. 1,5 millones
Periodo de diseño	Máx. 12 años
Carriles de circulación	Máx. 2 carriles

Además de satisfacer los requerimientos de tránsito y materiales, la aplicación de la guía requiere que el proyecto cuente con drenajes adecuados, de manera que se garantice la evacuación de las aguas pluviales, así como las obras complementarias requeridas para satisfacer la demanda hídrica de la zona del proyecto.

4. Catálogo y asignación de estructuras

En el Cuadro 6 se presenta una de las matrices de asignación de estructuras, en donde se muestra que, para unas condiciones predefinidas, existen una o dos estructuras que pueden satisfacer esa demanda.

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

Período de diseño = 6 Años_ MR 9000 psi						
Tránsito promedio diario						
Pesados	T ₅₀₀	T ₈₀₀	T ₁₂₀₀	T ₂₀₀₀	T ₃₅₀₀	T _{>3500}
P _{3%}	EP13	EP13	EP13	EP15, EP11	EP11	EP11
P _{4%}	EP13	EP13	EP13	EP15, EP11	EP11	EP11
P _{5%}	EP13	EP13	EP15, EP11	EP11	EP11	EP11
P _{7%}	EP13	EP15, EP11	EP15, EP11	EP11	EP11	EP11
P _{8,5%}	EP13	EP15, EP11	EP11	EP11	EP11	
P _{14%}	EP15, EP11	EP11	EP11	EP11		
P _{15%}	EP15, EP11	EP11	EP11	EP11		

Con la información analizada se diseñaron y filtraron ocho estructuras finales que conforman el catálogo de diseños, de tal forma que para todas las condiciones de demanda exista al menos una estructura de pavimento que cumpla. En la figura 4 se muestran, a manera de ejemplo, dos estructuras codificadas como EP13 y EP14 (estructura de pavimento 13 y 14).

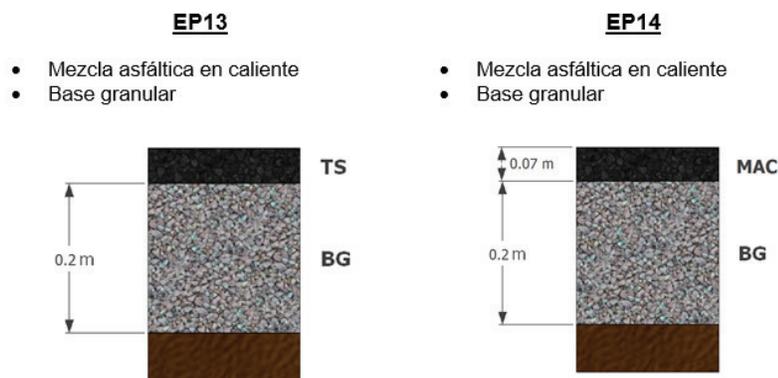


Figura 4. Ejemplo de dos estructuras que conforman el catálogo de estructuras

5. Herramienta (GBV-2020)

La GBV se complementa con una herramienta de software que permite seleccionar la estructura de pavimento adecuada para el proyecto de una manera ágil y simple. La herramienta no realiza ningún cálculo adicional, pues se basa en la información proporcionada por el usuario para presentar la o las estructuras adecuadas, de acuerdo con lo establecido en la GBVo.

Para utilizar la herramienta es necesario conocer adecuadamente la GBV. Al iniciar un proyecto nuevo, la herramienta le presenta al usuario una lista de condiciones que el proyecto debe cumplir para que se pueda aplicar la metodología de diseño simplificado. Una vez que el usuario ha verificado las condiciones, se presenta una ventana como la que se muestra en la Figura 5, en donde el usuario ingresa los datos del proyecto y al presionar *Ejecutar*, la herramienta el presenta el (los) diseño(s) aptos para el proyecto.

Herramienta para diseño simplificado

Información del Proyecto

Proyecto: Prueba Fecha: 2021-10-06

Provincia: San José Cantón: Montes de Oca

Distrito: San Pedro Ubicación: Ciudad de la investigación

Ruta: Prueba Est. Inicial (km): 0.5

Longitud (km): 1 Est. Final (km): 1.5

Vida útil (años): 8 Transito (TPD): 1600

Pesados (%): 5 CBR (%): 8

Responsable: GCH

Solución(es)

Identificador de la estructura: EBE-2
Tipo de superficie: Mezcla asfáltica en caliente (MAC)
Espesor MAC: 5.0
Tipo de base: Base estabilizada (BE)
Espesor de base: 20.0cm CBR: 80%
Tipo de subbase: Subbase granular (SB)
Espesor de subbase: 20.0cm CBR: 30%
Subrasante CBR: 8.0%
ESALs admisibles: 3905777

Nota: La interpretación y aplicación de estos resultados requiere una revisión exhaustiva de la Guía de diseño de bajo volumen para pavimentos flexibles y semirrígidos.

© 2020 Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

Figura 5. Ventana principal de la Herramienta para diseño simplificado

6. Conclusiones

La Guía simplificada para el diseño de pavimentos de bajo volumen de tránsito (GBV), Tomo II de la Guía de diseño estructural de pavimentos de Costa Rica (GDP-2020) está enfocada en brindar soluciones de diseño simples, eficientes y ágiles para aquellas rutas que, por sus características de tránsito, puedan ser definidas como de bajo volumen. Para su adecuada aplicación, el proyecto debe satisfacer una serie de condiciones de tránsito, materiales, geometría y drenaje. La verificación de estos requisitos es responsabilidad del diseñador, quien debe seguir todos los lineamientos establecidos en la guía y en la normativa nacional (CR-2010 o su versión vigente).

La guía se complementa con la herramienta de diseño simplificado. Este programa de computadora asiste al usuario en la selección de las estructuras adecuadas para su proyecto y dará mayor robustez a los proyectos de pavimentos de bajo volumen que, históricamente en Costa Rica, se han llevado a cabo sin un diseño previo y determinando espesores de capas mediante criterios económicos. La introducción de criterios técnicos a estos proyectos aumentará la vida útil de los proyectos, aumentará la cantidad de tramos pavimentados con buena calidad y mejorará la calidad de vida de los usuarios.

7. Bibliografía

Arias, E. (2017). *Propuesta para una guía de diseño de bajo volumen para pavimentos flexibles y semirrígidos (LM-PI-GM-INF-05-16)*. San Pedro: LanammeUCR.

Arias, E. (2019). *Guía de diseño de bajo volumen para pavimentos flexibles y semirrígidos de bajo volumen (LM-PI-UMP-103)*. San Pedro: LanammeUCR.



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

PITRA

Programa de
Infraestructura del Transporte

Ing. Ana Luisa Elizondo Salas, M.Sc.
Coordinadora General - Programa de Infraestructura del Transporte

Unidad de Seguridad Vial y Transporte (USVT)

Ing. Javier Zamora Rojas, M.Sc.
Coordinador USVT

Unidad de Normativa y Actualización Técnica (UNAT)

Ing. Raquel Arriola Guzmán, M.Sc.
Coordinadora UNAT

Unidad de Investigación en Infraestructura del Transporte (UIIT)

Ing. Ana Luisa Elizondo Salas, M.Sc.
Coordinadora UIIT

Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional (UGERVN)

Ing. Roy Barrantes Jiménez, M.Sc.
Coordinador UGERVN

Unidad de Gestión Municipal (UGM)

Ing. Erick Acosta Hernández
Coordinador UGM

Comité Editorial 2021:

- Ing. Ana Luisa Elizondo Salas, M.Sc., Coordinadora General PITRA.
- Ing. Raquel Arriola Guzmán, M.Sc., Unidad de Normativa y Actualización Técnica, PITRA.
- Rosa Isella Cordero Solano, Unidad de Normativa y Actualización Técnica, PITRA.

CENTRO DE TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA

Diagramación: Licda. Daniela Martínez Ortiz.

Control de calidad: Óscar Rodríguez Quintana.

*Guía simplificada para el diseño de pavimentos de bajo volumen de tránsito (GBV),
Tomo II de la Guía de diseño estructural de pavimentos de Costa Rica (GDP-2020)*

Palabras clave: Pavimentos, flexibles, semirrígidos, bajo volumen, diseño

(506) 2511-2500

✉ direccion.lanamme@ucr.ac.cr • www.lanamme.ucr.ac.cr