UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DESARROLLO DE UNA GUÍA PRÁCTICA PARA EL USO DEL SOFTWARE WINDEPAV 2.6 APLICADA EN UN PAVIMENTO FLEXIBLE

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de ingeniero e ingeniera civil

AUTORES: Mario Javier Fernández Heredia

Danmar Michelle Granda Sanchez

TUTOR: Hugo Patricio Carrión Latorre

Quito - Ecuador
2025

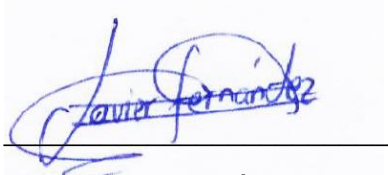
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Mario Javier Fernández Heredia con documento de identificación N° 1600510489 y Danmar Michelle Granda Sanchez con documento de identificación N° 1105481012; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 13 de marzo del 2025

Atentamente,



Mario Javier Fernández Heredia
1600510489

Danmar Michelle Granda Sanchez
1105481012

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Mario Javier Fernández Heredia con documento de identificación N° 1600510489 y Danmar Michelle Granda Sanchez con documento de identificación N° 1105481012; expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: "Desarrollo de una Guía Práctica para el uso del Software Windepav 2.6 aplicada en un pavimento flexible", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero e Ingeniera Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 13 de marzo del 2025

Atentamente,

Mario Javier Fernández Heredia
1600510489

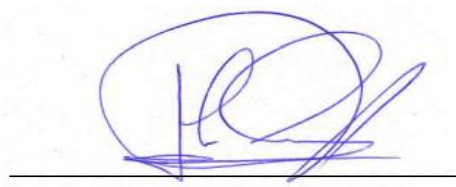
Danmar Michelle Granda Sanchez
1105481012

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Hugo Patricio Carrión Latorre con documento de identificación N° 0603015728, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DESARROLLO DE UNA GUÍA PRÁCTICA PARA EL USO DEL SOFTWARE WINDEPAV 2.6 APLICADA EN UN PAVIMENTO FLEXIBLE, realizado por Mario Javier Fernández Heredia con documento de identificación N° 1600510489 y por Danmar Michelle Granda Sánchez con documento de identificación N° 1105481012, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 13 de marzo del 2025

Atentamente,



Ing. Hugo Patricio Carrión Latorre MSc.

0603015728

DEDICATORIA

A mis Padres, Mario Fernández y Amanda Heredia; los pilares de mi vida, quienes, con su amor incondicional, sacrificio y ejemplo me enseñaron que los sueños se alcanzan con esfuerzo y perseverancia. Ustedes han sido mi refugio en los momentos más difíciles, mi mayor alegría en cada triunfo. Este logro es fruto de su apoyo constante, de sus palabras de aliento y de confianza en mí. No hay palabras suficientes para agradecerles todo lo que han hecho por mí.

A mi hermana Isabel, gracias por estar a mi lado en cada paso de este camino. Tus palabras de ánimo, y tu fe en mi fueron una luz que me guio en los momentos más difíciles de mi vida, y me dieron fuerzas para continuar cuando más lo necesitaba. Gracias por recordarme siempre que no estaba solo y que todo esfuerzo tiene su recompensa.

A mis Abuelitos, Efrén y Emma, quienes desde el cielo me guían y me protegen. Su amor y enseñanzas que me dieron han sido una fuente constante de fortaleza en mí. Este triunfo también es un homenaje a su memoria, porque sus valores y legado viven en mí.

A todas las personas y amigos que, de alguna manera, me brindaron su apoyo durante este proceso. Desde un consejo oportuno hasta un gesto de apoyo, cada acción ha dejado una huella imborrable en mi vida.

Y a Dios, mi guía y fortaleza, quien nunca me dejo desfallecer. Gracias por darme el valor para seguir adelante, por renovar mis fuerzas cuando todo parecía perdido y por bendecir este camino con oportunidades y aprendizajes.

Mario Javier Fernández Heredia

DEDICATORIA

Con profundo amor, dedico este trabajo a mi madre mi mayor fortaleza que ha sido un pilar fundamental en mi vida y en la culminación de este logro, quien, con su amor incondicional, sacrificios me ha ensañado que no hay meta inalcanzable cuando se lucha. A mi abuelita Carmen le agradezco por sus palabras de aliento, por su amor, cariño que me han acompañado en los momentos más difíciles.

A mi abuelito Toño, que está en el cielo, pero permanece presente en mi corazón y yo sé que con sus bendiciones me cuida y me bendice en cada decisión que tomo. Este trabajo es también un homenaje a él, por las valiosas enseñanzas que me dejo y el amor incondicional que me brindo.

También quiero dedicar este logro a Jonathan, mi compañero de vida, por estar junto a mi toda mi carrera Universitaria, Gracias por apoyarme en cada momento, por tu paciencia y por creer en mi incluso cuando yo dudaba. Tus palabras de aliento, tu confianza en mis capacidades y tu amor han sido fundamental para superar los desafíos que encontré a lo largo de esta etapa.

Este logro no habría sido posible sin ti, y por eso este trabajo también es tuyo, valoro profundamente que seas mi mayor motivación, por estar siempre presente en cada paso, celebrando cada éxito y dándome animo a seguir adelante.

Danmar Michelle Granda Sanchez

AGRADECIMIENTO

En este momento tan significativo de mi vida, quiero extender un profundo agradecimiento a quien han formado parte de este proceso llamado vida.

A Dios, por ser mi consejero y fortaleza en cada paso de este camino. Gracias por las bendiciones que he recibido.

A mis padres, por ser el motor de mi vida, su amor, sacrificio y dedicación han sido mi mayor inspiración. Ustedes me han enseñado a no rendirme, a seguir luchando por mis sueños, sin importar cuán difíciles sean los desafíos.

A mi hermana, gracias por tu aliento, por estar siempre allí, por apoyarme en todo este proceso de la Universidad. Tu amor ha sido el líquido vital que me ha impulsado a seguir adelante.

A todas las personas, amigos y docentes, gracias por cada apoyo, cada consejo que me ha sido de mucha ayuda a lo largo de esta carrera Universitaria.

Mario Javier Fernández Heredia

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Jesús por permitirme culminar esta etapa universitaria, quien ha sido mi guía y fortaleza durante esta etapa. Gracias por darme salud, la sabiduría necesaria para superar cada desafío.

A mi madre que siempre me ha brindado su apoyo incondicional para poder cumplir mis objetivos personales y académicos, valoro por estar siempre a mi lado, en los momentos de alegría y en los más difíciles animándome a no rendirme.

Agradecer a mi novio y mi familia quienes han sido mi inspiración, su apoyo, paciencia y las palabras de aliento, me han permitido mantenerme firme en este proceso y dar lo mejor de mi para alcanzar esta nueva meta.

Finalmente quiero agradecer a los docentes que han sido parte fundamental en la universidad, por trasmitirme los conocimientos necesarios para aprender y hoy ser una gran profesional.

Danmar Michelle Granda Sanchez

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO I **1**

ANTECEDENTES Y GENERALIDADES **1**

1.1. INTRODUCCIÓN **1**

1.2. PROBLEMA DE ESTUDIO **1**

1.2.1 Antecedentes 1

1.2.2. Importancia y alcance 2

1.2.3 Delimitación 2

1.3. JUSTIFICACIÓN **2**

1.4. OBJETIVOS **3**

1.4.1. Objetivo general 3

1.4.2. Objetivos específicos 3

CAPÍTULO II **4**

MARCO TEÓRICO **4**

2.1. ESTRUCTURA DE LA VÍA **4**

2.2. TIPOS DE PAVIMENTOS **9**

2.3. PAVIMENTOS FLEXIBLES **9**

2.4. PAVIMENTOS RÍGIDOS **14**

CAPÍTULO III **15**

METODOLOGÍA **15**

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN **15**

3.2. MÉTODO **15**

3.3. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN 15

3.4. PROCESO TÉCNICO DE INGENIERÍA CIVIL 15

CAPÍTULO IV 16

DESARROLLO DE UNA GUÍA PRÁCTICA PARA EL USO DEL SOFTWARE WINDEPAV 2.6 APLICADA EN UN PAVIMENTO FLEXIBLE 16

4.1. PARTE 1: INTRODUCCIÓN DEL SOFTWARE WINDEPAV 2.6 16

4.2. PARTE 2: INTRODUCCIÓN DE DATOS E INTERPRETACIÓN EN EL SOFTWARE WINDEPAV 2.6 26

4.3. PARTE 3: EJEMPLO PRÁCTICO 41

CONCLUSIONES 79

RECOMENDACIONES 81

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 82

GLOSARIO DE TÉRMINOS 84

ANEXOS 86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 *Información tráfico promedio diario* 41

Tabla 2 *Tasa de crecimiento anual* 42

Tabla 3 *Información datos TPDA* 42

Tabla 4 *Información porcentaje vehicular* 43

Tabla 5 *Factor de daño según el tipo de vehículos* 44

Tabla 6 *Periodo de diseño en función del tipo de carretera* 44

Tabla 7 *Tránsito promedio diario de vehículos* 45

Tabla 8 *Tasa de crecimiento anual* 46

Tabla 9 *Tasa de crecimiento vehicular* 48

Tabla 10 *Tráfico promedio semanal dos sentidos* 48

Tabla 11 *Cálculo total de vehículos para el diseño* 52

Tabla 12 *Crecimiento del tráfico para 20 años* 52

Tabla 13 *Tráfico total futuro* 55

Tabla 14 *Factores de daño* 55

Tabla 15 *Factor carril (Fc)* 57

Tabla 16 *Cálculo total de vehículos de diseño* 57

Tabla 17 *Cálculo ejes equivalentes 8.2 ton (W18)* 58

Tabla 18 *Niveles recomendados de confiabilidad* 59

Tabla 19 *Factores de desviación normal* 60

Tabla 20 *Desviación estándar recomendada* 60

Tabla 21 *Resistencia del diseño* 62

Tabla 22 *Percentil de resistencia del suelo* 64

Tabla 23 *Capacidad de drenaje del material* 68

Tabla 24 *Coeficientes de drenaje para pavimentos flexible* 69

Tabla 25 *Resumen de datos calculados*..... 69

Tabla 26 *Espesores mínimos según ejes*..... 71

Tabla 27 *Análisis de resultados entre AASHTO 93 y WinDEPAV 2.6.*..... 77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 *Diferencias en el comportamiento de pavimento flexible y rígido bajo carga* 9

Figura 2 *Página principal de descarga del programa* 16

Figura 3 *Panel de control* 17

Figura 4 *Configuración de formatos* 18

Figura 5 *Configuración de formato numérico* 19

Figura 6 *Barra de menú: Archivo* 20

Figura 7 *Barra de menú: DEVAP* 21

Figura 8 *Barra de menú: Acerca de* 22

Figura 9 *Ventana principal WinDEPAV 2.6* 23

Figura 10 *Ingreso de datos en descripción del proyecto* 27

Figura 11 *Número de capas* 28

Figura 12 *Ubicación del archivo* 29

Figura 13 *Ingreso de datos del módulo elástico* 30

Figura 14 *Coeficiente de Poisson* 31

Figura 15 *Espesor de cada capa de pavimento* 32

Figura 16 *Daño por tensión* 33

Figura 17 *Asistente para calcular fatiga* 34

Figura 18 *Daño por compresión* 35

Figura 19 *Asistente para la asignación de factores por compresión* 36

Figura 20 *Carga en la superficie del pavimento* 37

Figura 21 *Geometría del semieje de carga sobre el pavimento* 38

Figura 22 *Resultados del análisis* 39

Figura 23 *Línea de tendencia del tráfico liviano* 46

Figura 24 *Línea de tendencia del tráfico de buses* 47

Figura 25 *Línea de tendencia del tráfico de camiones*..... 47

Figura 26 *Percentil vs CBR*..... 63

Figura 27 *Gráfico para determinar el coeficiente estructural a1*..... 65

Figura 28 *Monograma para determinar el coeficiente estructural* 66

Figura 29 *Coeficiente estructural para subbase granular*..... 67

Figura 30 *Calculo SN ecuación AASHTO-93* 72

Figura 31 *Calculo SN ecuación AASHTO-93* 74

Figura 32 *Programa para calcular el SN de la subbase granular* 76

Figura 33 *Espesores de carpeta asfáltica ASSTHO-93*..... 78

Figura 34 *Espesores de carpeta asfáltica WinDEPAV 2.6.* 78

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 *Gráfico de respuesta máxima en las interfaces del Sigma Z*..... 86

Anexo 2 *Gráfico de respuesta máxima en las interfaces del Sigma T*..... 87

Anexo 3 *Gráfico de respuesta máxima en las interfaces del Épsilon Z* 88

Anexo 4 *Gráfico de respuesta máxima en las interfaces del Épsilon T* 89

RESUMEN

WinDEPAV 2.6 es un software derivado del programa DEPAV, desarrollado por el Instituto de Vías de la Universidad del Cauca en Colombia, que facilita el análisis y diseño de pavimentos flexibles. Es una herramienta que puede ser utilizada tanto por ingenieros como por estudiantes de ingeniería. Este programa nos permite calcular características del pavimento como su espesor adecuado, incluso el material que se podría utilizar, teniendo en cuenta las condiciones del tráfico y del terreno.

En nuestro país no disponemos de una guía práctica que nos instruya en el funcionamiento de este software, por esta razón, este proyecto técnico tiene como objetivo desarrollar una guía práctica para el uso del programa WinDEPAV 2.6, además comprobar del funcionamiento a través de un ejercicio práctico.

WinDEPAV 2.6 es un software que se puede aplicar en el diseño nuevas carreteras, rehabilitación de pavimentos y estudios de viabilidad, este programa también nos permite realizar simulaciones para visualizar el comportamiento del pavimento en diferentes condiciones climáticas, variaciones de tráfico y tipo de terreno.

Este software es gratuito y se lo puede obtener desde la página oficial de INGEPAV, donde nos da indicaciones acerca de su instalación y características acerca del programa.

Palabras clave: WinDEPAV 2.6, diseño de pavimento, guía práctica

ABSTRACT

WinDEPAV 2.6 is a software derivative of DEPAV program, developed by Instituto de Vias de la Universidad del Cauca in Colombia, that makes it easier the analysis and design of flexible pavements. It is a tool that can be used by both engineers and engineering students. This program let calculate characteristics of pavements like the proper thickness, even the materials that could be used, considering traffic and terrain conditions.

In our country, we do not have a practical guide that teaches the functioning of this software. For this reason, this technical project aims to develop a practical guide for using the WinDEPAV 2.6 program, as well as to verify its functionality through a practical exercise.

WinDEPAV 2.6 is a software that can be applied to the design of new roads, pavement rehabilitation, and feasibility studies. This program also allows us to perform simulations to visualize the behavior of the pavement under different climatic conditions, variations in traffic, and types of terrain.

This software is free and can be obtained from the official website of INGEPAV, which provides instructions for its installation and details about the program.

Keywords: WinDEPAV 2.6, pavement design, practical guide

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES Y GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

WinDEPAV 2.6 es un programa ideal para analizar, diseñar y calcular las características de pavimentos, como el espesor, los esfuerzos y las deformaciones de las capas, datos fundamentales para garantizar que el diseño sea duradero a largo plazo y evitar fallos prematuros. Además, permite efectuar simulaciones para evidenciar la reacción del pavimento antes distintas condiciones climáticas, variaciones en el tráfico y el tipo de terreno (Vásquez, 2018).

Cabe destacar que el software se alinea a regulaciones de construcción, normativas y estándares nacionales e internacionales establecidas por organismos de transporte. Asimismo, genera informes detallados con datos sobre los resultados del diseño y los cálculos; de ahí que constituya un recurso elemental para la praxis profesional y en los entornos educativos (Vásquez, 2018).

1.2. PROBLEMA DE ESTUDIO

1.2.1 Antecedentes

Si bien la versión estudiantil del programa es ideal para que el usuario pueda establecer la estructura del pavimento y las características de las capas y cargas, en Ecuador no existe hasta el momento una guía que facilite su uso (Vásquez, 2018). En consecuencia, varios alumnos y profesionales del medio se inclinan hacia métodos tradicionales que exigen más tiempo de modelado y ocasionan que el proyecto de desarrollo presente más demoras.

En vista de este panorama, es fundamental poner en marcha la creación de una guía de uso de WinDEPAV 2.6 con la finalidad de sacar el máximo provecho a todas sus herramientas. A fin de cuentas, la precisión, agilidad y eficiencia con la que se generan los datos aporta a tomar decisiones sustentadas y contar con infraestructuras viales más perfeccionadas.

1.2.2. Importancia y alcance

La importancia del estudio radica en que al desarrollarse una guía de uso de WinDEPAV 2.6 versión estudiantil, el programa podría emplearse en la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica Salesiana (UPS), específicamente en proyectos de diseños viales en los que intervengan pavimentos flexibles. Vale resaltar que la guía abarca todas las etapas del diseño de pavimentos flexibles, desde el registro de datos hasta el análisis de los resultados, de tal forma que el usuario tenga una experiencia de uso bastante sencilla e integral.

1.2.3 Delimitación

El presente proyecto radica en la elaboración de guía de uso de WinDEPAV 2.6 que detalla los pasos claramente para la aplicación del programa en su versión estudiantil. Por su naturaleza, el trabajo está enfocado en los alumnos universitarios y en los profesionales de la carrera, quienes requieren elaborar diseños viales que tomen en cuenta pavimentos flexibles.

Es importante aclarar que la UPS no cuenta hasta el momento con una licencia de uso del software. Sin embargo, es posible descargarlo directamente del portal INGEPAV o de la página oficial de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, específicamente de la sección de investigación.

1.3. JUSTIFICACIÓN

La mayor parte del comercio nacional depende sustancialmente de las carreteras y el transporte terrestre, lo que implica contar con un sistema vial en óptimas condiciones para garantizar la seguridad de los transportistas. Por esa razón, incluir la implementación del pavimento flexible es crucial debido a que brinda un mejor desempeño del tránsito vehicular, su implementación es más económica y amigable con el ambiente, la instalación y el mantenimiento son más ágiles e inclusive resulta más resistente ante las adversidades climáticas (Lynch, 2022). En otras palabras, contribuye notoriamente a elevar el grado de seguridad vial.

Ahora bien, parte del desarrollo vial exige utilizar distintos recursos, como WinDEPAV 2.6, que hoy en día configura una herramienta sustancial para analizar la reacción de los pavimentos ante distintas cargas, de tal modo que puede optimizarse su estructura y reducir en gran medida potenciales errores durante cálculos complejos (Vásquez, 2018). Ciertamente, para utilizar este programa, el usuario requiere contar con conocimientos básicos de diseño de pavimentos, por lo que desarrollar una guía facilitaría en gran medida su uso y aplicación en el contexto estudiantil y profesional, garantizando el correcto cumplimiento de las normativas y diseños viales con mayor vida útil.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Desarrollar una guía práctica del software WinDEPAV 2.6 para el diseño de pavimentos flexibles a través de un ejemplo práctico que asegure la correcta aplicación del programa.

1.4.2. Objetivos específicos

- Desarrollar manualmente un ejemplo práctico de diseño de un pavimento flexible, utilizando el método AASHTO-93 para replicarlo en WinDEPAV 2.6.
- Comparar los resultados obtenidos mediante cálculo manual con los resultados generados por WinDEPAV 2.6 para evaluar la concordancia entre ambos métodos.
- Desarrollar una guía práctica con una metodología funcional para el correcto uso de WinDEPAV 2.6.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ESTRUCTURA DE LA VÍA

Pavimento

El propósito de todo pavimento radica en contar con una superficie que realmente sea segura para los usuarios, independientemente de las condiciones ambientales del momento. Por supuesto, existen varios tipos que pueden emplearse en función del nivel de carga que deba soportar y el tipo de vehículos que transiten (Valenzuela, s.f.).

En cualquier caso, el conjunto de capaz es aquellas que forma el pavimento colocadas de manera horizontal y constituidas por materiales duraderos y sumamente compactados. Ellas se disponen sobre la subrasante de la vía, que se forma producto del traslado de tierras al momento de la construcción (Lynch, 2022).

La estructura de la carretera, a modo de un sistema de pavimentación, asegura la función vial, compuesta por una o diversas capas de material granular que están sobrepuestas de forma activa en la subrasante del suelo en estado original. Esta estructura se protege posteriormente mediante una capa de rodadura asfáltica o de concreto de cemento Portland, con o sin refuerzo metálico (Lynch, 2022).

El terreno de fundación o conocido de igual manera como terraplén, es parte del conjunto de capas de subbase, base, rodamiento y sello que es la estructura donde descansa.

Clasificación de los pavimentos

La clasificación puede hacerse considerando varios puntos de vista:

- Cantidad de componentes que forman parte
- Lugar en el que se proporciona los servicios
- La disposición que adquieren
- Por los materiales que lo conforman

- Mecanismo de trasferencia de carga a la subrasante

De acuerdo con la cantidad de elementos que lo conforman pueden ser

- Simple: al estar configurado por apenas un elemento
- Compuesto: al estar establecido por múltiples elementos

En función del sitio donde se utilizan, los pavimentos pueden dividirse en

- Pavimentos para viviendas: como los de aparcamientos
- Pavimentos urbanos: utilizados en calles, parques, paseos y plazas
- Pavimentos para zonas costeras: como malecones, áreas portuarias y embarcaderos

De acuerdo con los materiales que lo integran:

- Suelos estables
- Pavimentos asfalticos o bituminosos
- Pavimentos de hormigón o de cemento
- Pavimentos varios

El estudio de los pavimentos se puede llegar a determinar mediante las siguientes fases

- **Fase de proyecto**

  En esta etapa se abordan aspectos como conceptos básicos, definiciones, diseño de espesores, preparación de mezclas asfálticas y estabilización de suelos (Lynch, 2022).

- **Fase de construcción**

  Se enfoca en técnicas y prácticas de construcción, las herramientas necesarias, las especificaciones técnicas vigentes en el país para avalar una ejecución adecuada, y la intervención requerida para asegurar un buen desempeño del pavimento diseñado (Lynch, 2022).

- **Fase de mantenimiento**

  Aquí se analizan las fallas en los pavimentos, los procedimientos necesarios para su preservación, y el diseño de espesores para repavimentación, entre otros aspectos (Lynch, 2022).

El diseño estructural debe cumplir con un propósito principal del pavimento, que es proporcionar a los usuarios un área de rodadura cómoda, libre de anormalidades, segura, perdurable, resistente a la deformaciones prematuras y capas de proteger la base de los efectos del tráfico y las condiciones climáticas, es necesario diseñar una estructura adecuada, con factores claves que significativamente en el desempeño del pavimento a corto, mediano y largo plazo cumplan todos los requisitos.

Aspectos para evaluarse sobre el suelo

- **Propiedades mecánicas de los suelos de fundación**

  Evaluar las condiciones del suelo donde se instalará la estructura, así como los materiales granulares disponibles para conformar las distintas capas. Esto incluye aspectos como la clase de suelo, los factores de exposición a agentes climáticos, así como el valor de soporte CBR.

- **Volumen y características del tránsito previsto**

  Considerar el tráfico esperado en el periodo de diseño en años, incluyendo cargas proyectadas y los efectos de canalización que afectaran al pavimento, representadas por el parámetro W18.

- **Condiciones de drenaje**

  Analizar las condiciones de drenaje en el área adyacente y en la zona a pavimentar para garantizar que el agua no comprometa la estabilidad del pavimento.

- **Disponibilidad y rendimiento de los materiales de construcción**

  Evaluar la calidad de los materiales disponibles, considerando su capacidad referente para tolerar las cargas al integrarse en la estructura, representada por el número estructural (SN).

Funciones del pavimento

- **Soportar cargas de tránsito**

  Las cargas vehiculares deben repartirse eficientemente entre las capas para evitar deformaciones y daños estructurales profundos (Huang, 2004).

- **Resistentes a los agentes climáticos**

  El pavimento tiene que ser sumamente resistente a las variaciones ambientales como humedad, olas de calor o frio. Al fin y al cabo, el impacto del clima acelera el desgaste (Yoder y Witczak, 1991).

- **Seguridad y confort para los usuarios**

  La textura, así como superficie y adherencia que ofrezca para evitar el desplazamiento incide negativa o positivamente en la protección y facilidad de los conductores y transeúntes. Por ese motivo, Delatte (2014) resalta que un terreno rugoso es lo ideal.

- **Durabilidad del pavimento**

  Lo ideal es que el pavimento tenga una vida útil prolongada; en otras palabras, sea muy resistente al clima sin que sea necesario realizar mantenimientos frecuentes. En efecto, implica que el diseño esté tan bien concebido para que las propiedades estructurales se conserven a largo plazo (Asphalt Institute, 2007).

- **Control del ruido de rodadura**

  Como su nombre hace alusión, implica disminuir el ruido ocasionado por la unión con las llantas y la superficie, problemática de gran envergadura en zonas urbanas debido al impacto ambiental y a la salud. Precisamente, Zhu et al. (2023) enfatizan la importancia

de optimizar el patrón de rodadura de los neumáticos, pues solo de esa forma es posible garantizar el menor sonido posible.

- **Superficie impermeable y drenaje**

  Un diseño óptimo toma en cuenta la impermeabilidad de la superficie y las características de drenaje eficientes. Hay que tomar en cuenta que la acumulación de agua en las capas ocasiona el aumento de la presión y genera mayor debilidad, lo que podría ocasionar problemas producto de la expansión de la superficie debido a la humedad.

- **Propiedades visuales y prevención de deslumbramiento**

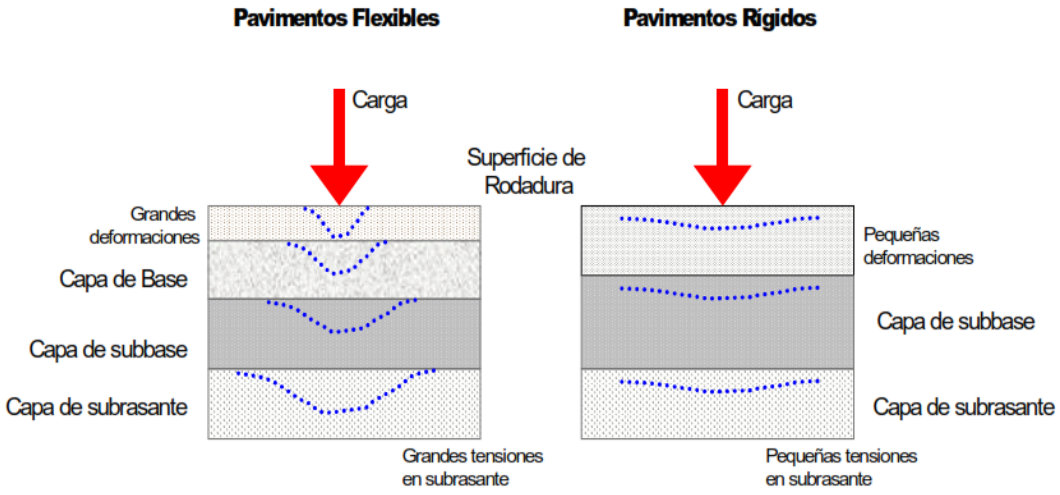
  El color del pavimento tiene una razón de ser, en vista de que debe ayudar a disminuir los reflejos para que el conductor cuente con una visibilidad óptima y segura, incluso en condiciones desafiantes. Este aspecto está relacionado también con la textura, pues en conjunto son responsables del nivel de deslumbramiento que exista (Universidad Mayor de San Simón [UMSS], 2019).

2.2. TIPOS DE PAVIMENTOS

La clasificación de los pavimentos se basa en el tipo de material que pueden ser rígidos y flexibles, tal como lo indica la Figura 1. Pero claro, hay que reconocer que ambas características no son en realidad fácilmente perceptibles (Dorado y Castro, 2023).

Figura 1

Diferencias en el comportamiento de pavimento flexible y rígido bajo carga



Nota. La imagen compara cómo reaccionan los pavimentos flexibles y rígidos cuando reciben una carga. Fuente: Coronado (2002).

2.3. PAVIMENTOS FLEXIBLES

Este tipo de pavimentos están conformados por una capa de asfalto asentada sobre otras dos no rígidas: base y subbase. Sin embargo, pueden prescindirse alguna de ellas según los requerimientos inherentes de cada proyecto (Montejo, 2002). Estos pavimentos cuentan con un revestimiento asfaltico sobre una capa base granular, de tal modo que se absorben las tensiones verticales de compresión provenientes del suelo de fundación mediante la resistencia a las tentaciones cortantes (Laínez, 2022).

En este proceso ocurren rigideces de deformación y arrastre en la zona inferior del revestimiento asfáltico, hecho que puede generar fisuras por fatiga como consecuencia de la

constante carga vehicular. Además, si ello ocurre con frecuencia, es casi inminente la aparición de hundimientos.

Finalmente, a continuación, se detallan los principales parámetros para llevar a cabo un diseño de pavimento mediante el método racional:

- Cantidad de ejes o vehículos que transitan
- Módulos elásticos de las capas
- Espesor de las capaz
- Temperatura del entorno

Diferentes capas de un pavimento flexible

Terreno de fundación: consiste en la capa que soporta al pavimento. Tras culminar el movimiento de tierras, y una vez finalizado el proceso de acondicionamiento, tiene que ajustarse a los cortes y las pendientes detalladas en los planos de diseño.

Superficie subrasante: configura la capa superior del suelo en la que se asienta el pavimento. Como es lógico, tiene que estar excelentemente preparada para que resista el peso del tráfico y consolide así una base firme (Chanaluisa y Chandi, 2024).

- **Subbase:** denominada así al área conformada por el material que se coloca sobre la superficie natural del terreno.
- **Base:** consiste en la capa dispuesta sobre la subbase y constituida por piedra triturada, mezcla de suelo con cemento, suelo cal, mezcla bituminosa, ente otros.

Carpeta de rodamiento: su nombre se debe a que es aquella zona superior del pavimento que entra en unión con los neumáticos de los vehículos. El propósito es que tenga una superficie lisa, segura y resistente el desgaste para garantizar un traslado suave y cómodo.

Carpeta de desgaste o sello: consiste en una capa fina aplicada sobre la capa de rodamiento a través de un riego asfáltico. Su principal objetivo es salvaguardarla del desgaste y el deterioro producido por el tráfico y las inclemencias meteorológicas.

Rasante: es el nivel más alto del pavimento, el cual resiste el tránsito vehicular (Lynch, 2022).

Método AASHTO 93 para pavimentos flexibles

El diseño de pavimentos es un método de ingeniería civil que se enfoca en asegurar la durabilidad y funcionalidad de las estructuras viales. A lo largo de los años diversos métodos han sido desarrollados para optimizar el rendimiento y la eficiencia de estos diseños.

Uno de los métodos más reconocidos y utilizados es el Método AASHTO 93, desarrollado por la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), el cual proporciona una metodología estructurada para diseñar pavimentos tanto flexibles como rígidos.

Este enfoque se basa en principios empíricos respaldados por investigaciones sobre el comportamiento del pavimento bajo cargas y factores ambientales diversas.

Desarrollo histórico del método AASHTO

Antes de la implementación formal del método AASHTO, el diseño de pavimentos se basaba principalmente en enfoques empíricos, fundamentados en la experiencia práctica de los ingenieros. Sin embargo, las diferencias en los tipos de suelo, el tráfico y las condiciones climáticas generaban resultados imprecisos y, en muchos casos, pocos eficientes.

En la década de 1950, el "Road Test de AASHO" jugo un papel clave para comprender como las cargas de tráfico afectaban los pavimentos y cómo las condiciones ambientales impactaban su desempeño.

Este ensayo, realizado en Ottawa, Illinois, introdujo el concepto de serviciabilidad, que evalúa la capacidad de un pavimento para ofrecer una superficie adecuada y segura para el tránsito, y permitió el desarrollo de ecuaciones empíricas para el de diseño de pavimentos.

El Método AASHTO 93, derivado de estos estudios, se basa en una evaluación cuantitativa de los efectos del tráfico y las condiciones ambientales sobre los pavimentos.

A través de ecuaciones diseñadas para prever el comportamiento del pavimento durante su vida útil el método AASHTO 93 considera factores como la cantidad y el tipo de tráfico, las propiedades de la subrasante, y las condiciones climáticas, entre otros.

Aspectos que afectan al diseño de construcción en pavimentos según AASHTO

El método AASHTO se basa en diversos factores clave que influyen de manera directa en el diseño de los pavimentos.

Estos factores se analizan mediante parámetros específicos del pavimento bajo diferentes condiciones. Los principales aspectos considerados incluyen:

- **Tránsito**

  El tipo de tráfico son fundamentales en el diseño. El método AASHTO determina el número de ejes equivalentes, es un parámetro utilizado para transformar diferentes configuraciones de carga en un valor común, lo que facilita la comparación y evaluación del pavimento. Este cálculo considera tanto la cantidad de vehículos como su tipo, ya que las cargas de los camiones pesados afectan considerablemente la durabilidad del pavimento.

- **Subrasante**

  La calidad y las características de la subrasante, que son los suelos sobre los cuales se construye el pavimento, juegan un papel crucial en su capacidad de soporte. El valor soporte California (CBR) es uno de los parámetros más utilizados para medir esta capacidad.

- **Materiales**

  Los materiales seleccionados en las capas del pavimento, como el concreto asfáltico o el hormigón deben cumplir con requisitos específicos de resistencia y durabilidad. En el caso de pavimentos rígidos, el módulo de elasticidad del hormigón es un parámetro fundamental para calcular cómo se distribuyen las tensiones. Para pavimentos flexibles,

se utilizan mezclas de materiales bituminosos cuya resistencia varía según su composición.

- **Condiciones Climáticas**

  El clima influye directamente en la deformación y el deterioro de los pavimentos. Factores como la temperatura, la humedad y los cambios estacionales tienen un efecto en la durabilidad del pavimento. Por lo tanto, el diseño debe tener en cuenta los coeficientes de drenaje para prevenir daños causados por la acumulación de agua y el hinchamiento de suelos expansivos debido a las variaciones de temperatura y los ciclos de congelación y deshielo.

Procedimiento del Diseño AASHTO

El procedimiento de diseño AASHTO se lleva a cabo en varios pasos, comenzando con la recopilación de datos sobre tránsito y las características del terreno. Luego se determina el número estructural (SN), que establece el espesor del pavimento según las condiciones de tráfico, la calidad de la subrasante y las propiedades de los materiales.

Se emplean ecuaciones empíricas, basadas en los estudios del AASHO Road Test, para calcular el espesor de cada capa del pavimento, garantizando que el pavimento pueda soportar las cargas de tráfico a lo largo de su vida útil sin experimentar fallas estructurales importantes.

2.4. PAVIMENTOS RÍGIDOS

Montejo (2002), en su libro *Ingeniería de pavimentos para carreteras*, expone que este tipo de pavimento se constituye por una losa de concreto hidráulico apoyada sobre una capa de material selecto, conocida como subbase. Gracias a la resistencia del concreto, el desenvolvimiento de este pavimento es sumamente satisfactorio, inclusive en las áreas débiles de la subrasante.

En cuanto a los componentes estructurales, el principal es la losa de concreto de cemento Portland (CCP), la cual amenora las tensiones que pueden producirse en las capas inferiores debido a la gran firmeza a la flexión. Sin embargo, las tensiones y deformaciones de tracción bajo la losa pueden fisurarla tras una serie de repeticiones de carga. Finalmente, la subbase, que está debajo de la losa CCP, a momentos contiene materiales de menor capacidad de soporte a los que son exigibles para aquellos usados en pavimentos flexibles.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

El estudio es descriptivo con el propósito de documentar a profundidad las funciones y características de WinDEPAV 2.6, incluyendo los pasos a seguir para el ingreso de datos, el análisis y la generación de resultados. Asimismo, implica desarrollar una guía práctica que es de gran utilidad para las personas interesadas en el diseño y el análisis de pavimentos flexibles.

3.2. MÉTODO

Por la naturaleza del trabajo se lleva a cabo el método analítico, que consiste en desintegrar al fenómeno de estudio en sus componentes individuales con miras a conocer el funcionamiento de cada uno en torno al diseño de pavimentos flexibles. Esta técnica busca estudiar las propiedades y los efectos con el afán de contar con un análisis detallado y una compresión profunda sobre el tema.

3.3. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

El proyecto requiere de la aplicación de la técnica de fichaje, un diagrama de flujo, descripciones e imágenes para plantear una guía de diseño entendible y sólida.

3.4. PROCESO TÉCNICO DE INGENIERÍA CIVIL

Al principio, la guía realiza una presentación preliminar de WinDEPAV 2.6, con sus correspondientes secciones y funcionalidades. Además, a lo largo del documento, se cuenta con descripciones y gráficos que le permiten al usuario alcanzar una comprensión más fácil sobre las funciones y características claves para el diseño de pavimentos flexibles.

Por otra parte, la guía incluye algunos conceptos esenciales para el uso adecuado del programa y, para tal efecto, se emplean explicaciones narrativas acompañadas de imágenes. También, se ilustra el proceso de diseño en su totalidad con un ejemplo práctico y, por último, el documento concluye con la elaboración de los reportes.

CAPÍTULO IV

DESARROLLO DE UNA GUÍA PRÁCTICA PARA EL USO DEL SOFTWARE WINDEPAV 2.6 APLICADA EN UN PAVIMENTO FLEXIBLE

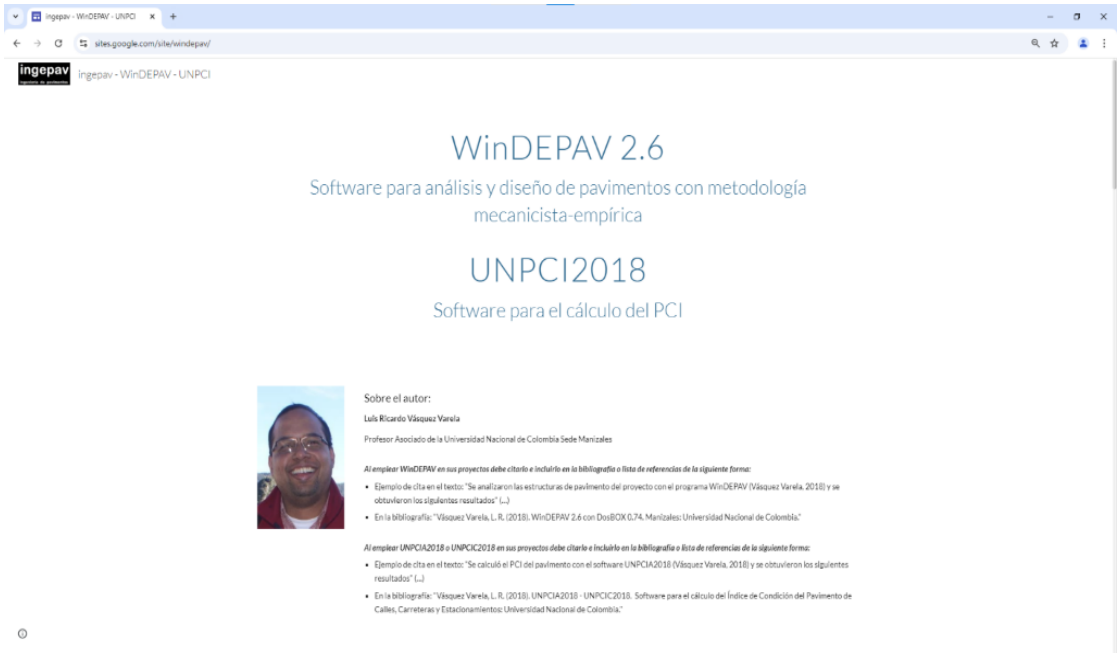
4.1. PARTE 1: INTRODUCCIÓN DEL SOFTWARE WINDEPAV 2.6

Cómo descargar el programa

A continuación, la Figura 2 presenta la página para descargar WinDEPAV 2.6:

Figura 2

Página principal de descarga del programa



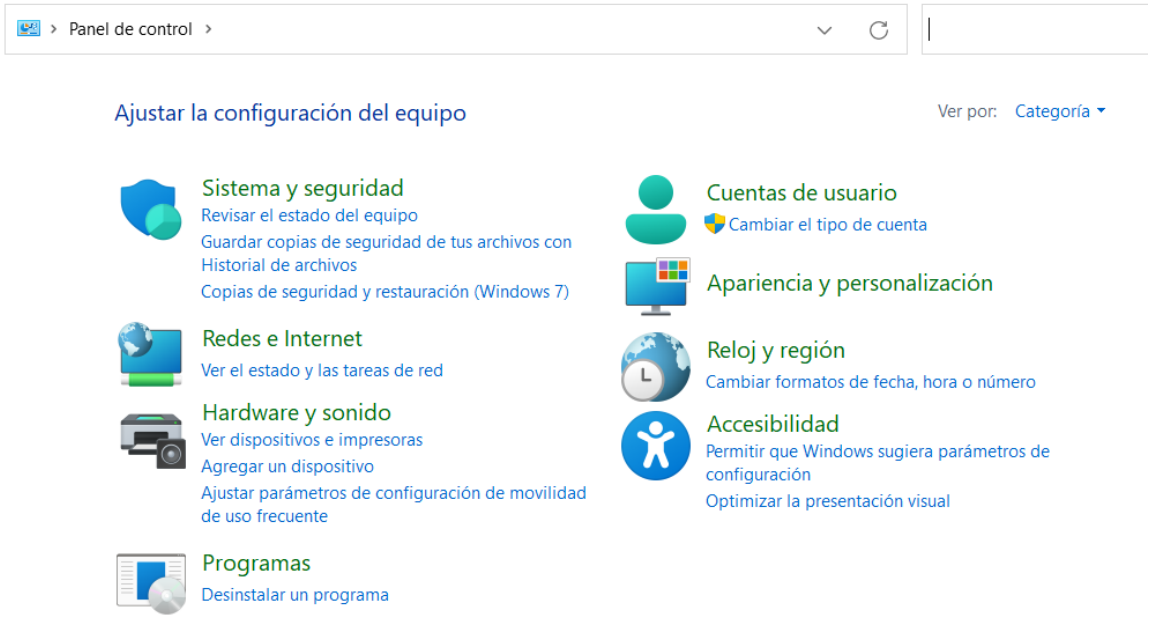
Nota. El programa puede descargarse gratuitamente al acceder al portar INGEPAV. Además, para el correcto uso tiene que instalarse DEPAVF.EXE, pues permite utilizar computadoras con hardware antiguo para ejecutar en ellas Windows 7, 8, 9 y 10 de 64 bits. Fuente: Vásquez (2018).

Instrucciones para configurar el sistema operativo Windows para WinDEPAV 2.6

La Figura 3 muestra el panel de control:

Figura 3

Panel de control



Nota. Es importante realizar este paso para garantizar que el formato de las fechas y números sean compatibles con las configuraciones requeridas por WinDEPAV 2.6. Fuente: Sistema operativo Windows.

Acceso al panel de control

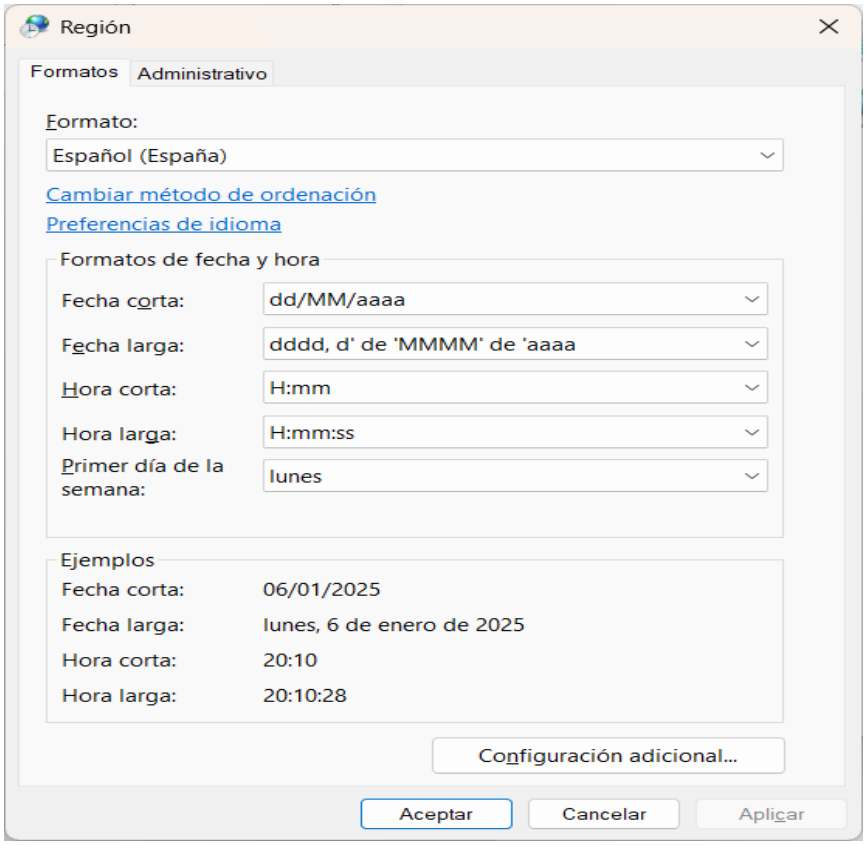
- Haga clic en el botón *inicio* localizado en la esquina inferior izquierda.
- Escriba *panel de control* en la barra de búsqueda y seleccione el resultado correspondiente.

Selección de la opción reloj y región:

- Localice y seleccione *reloj y región* para acceder a las configuraciones de formato, hora y número (Figura 4).

Figura 4

Configuración de formatos



Nota. Verificar estos parámetros antes de utilizar WinDEPAV 2.6, pues de estar incorrectos se generar errores en el procesamiento de los datos. Fuente: Sistema operativo Windows.

Seleccionar formato

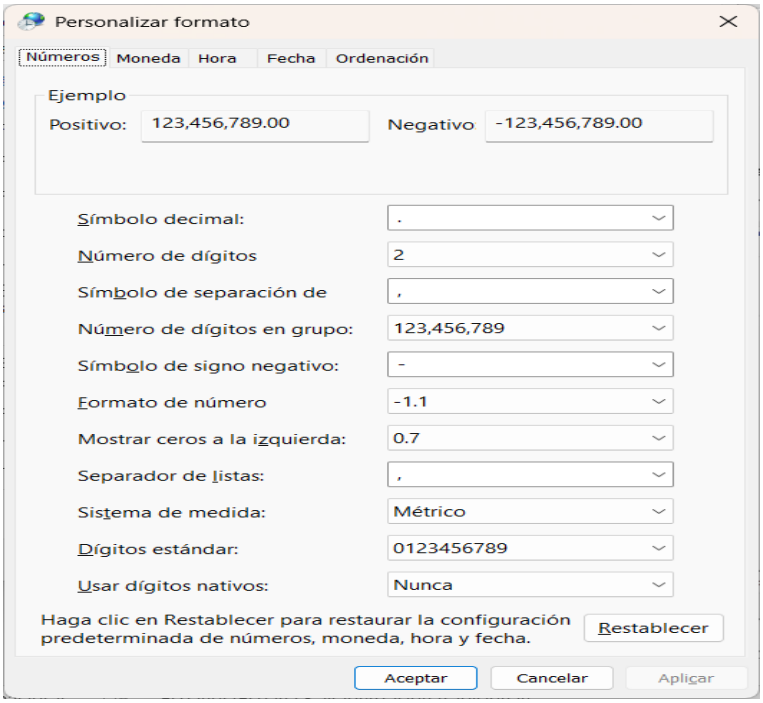
- Verifique que el formato este configurado en español o en el idioma correspondiente, de acuerdo con las especificaciones del programa.

Configuración adicional

- Haga clic en la opción *configuración adicional* para modificar los separadores (Figura 5).

Figura 5

Configuración de formato numérico



Nota. Estos parámetros tienen que estar correctamente configurados, puesto que podrían afectar en el rendimiento del programa y hasta provocar daños en el análisis de datos. Fuente: Sistema operativo Windows.

Acceso a la configuración numérica

- Una vez abierta la ventana *personalizar formato*, seleccione la pestaña *números*.

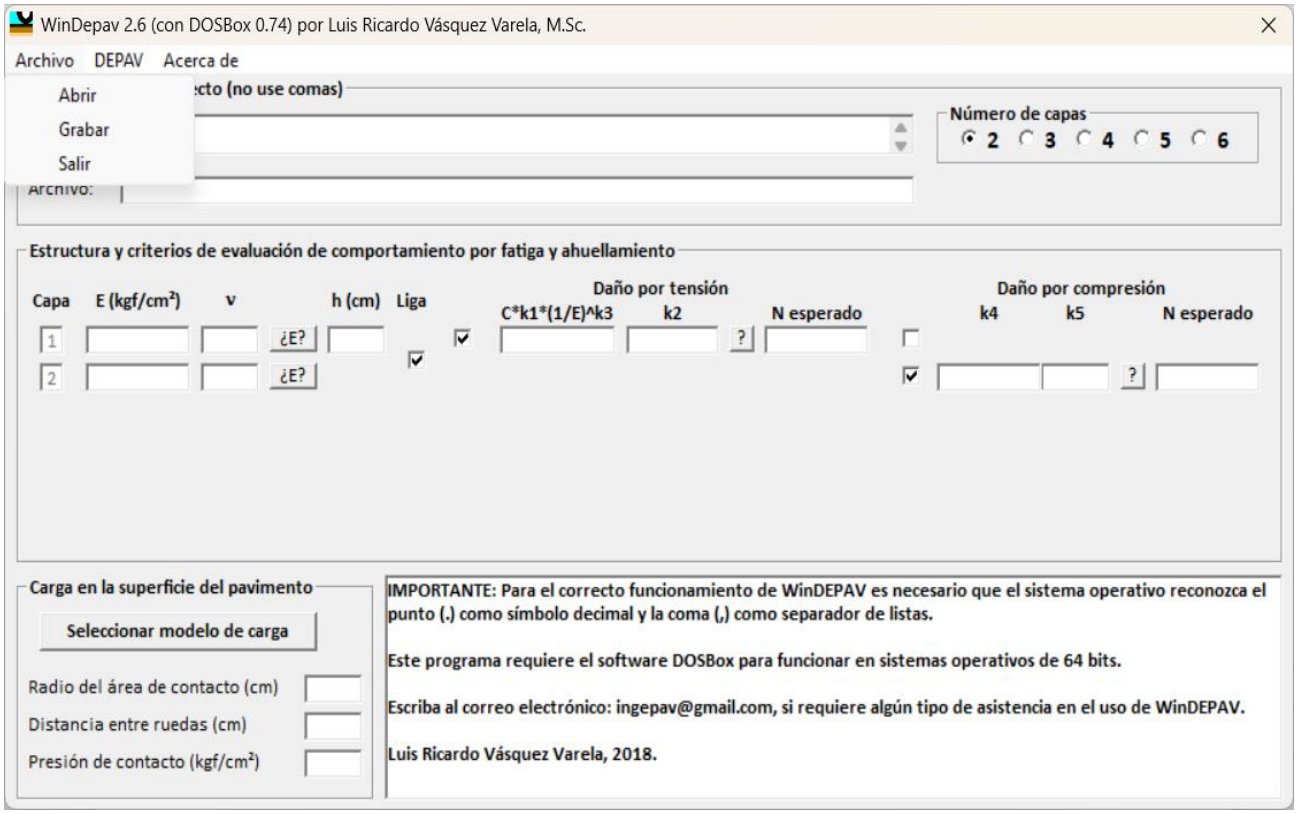
Ajustes específicos

- Símbolo decimal: verifique que el símbolo decimal sea un punto (.).
- Símbolo de separación de miles: configúrelo como uno coma (,).
- Separador de listas: asegúrese de que sea una coma (,).

Una vez finalizados estos pasos, el sistema operativo se encuentra debidamente configurado para garantizar el óptimo funcionamiento del software. Ahora sí es posible abrir el programa desde su acceso directo o desde la ubicación en la que esté instalado (Figura 6).

Figura 6

Barra de menú: Archivo



Nota. El correcto uso de este menú es esencial para optimizar la interacción y lograr un manejo ordenado y seguro de los proyectos. Fuente: Programa WinDEPAV 2.6.

Abrir: permite cargar un proyecto o archivo de configuración previamente guardado en el programa. Su principal utilidad es retomar trabajos anteriores sin necesidad de volver a ingresar los datos desde el inicio.

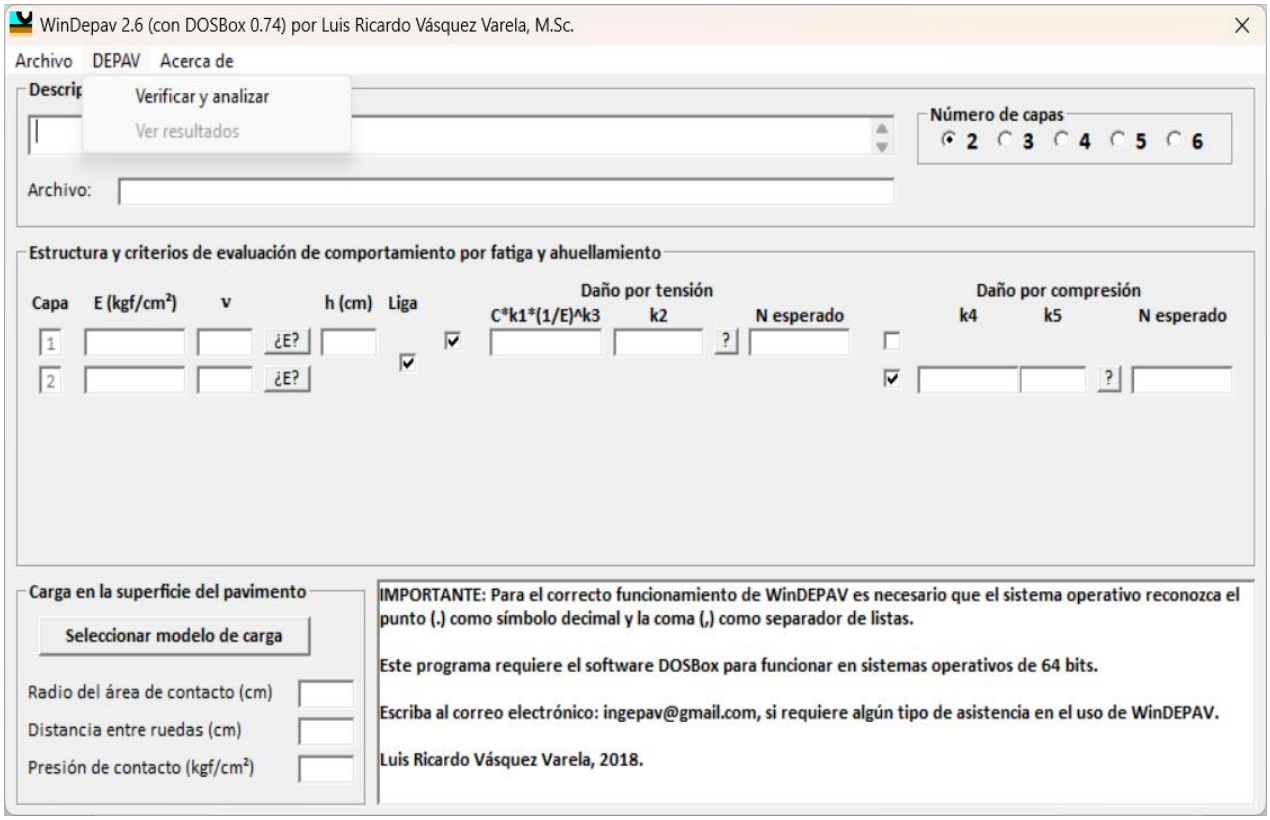
Grabar: el usuario puede guardar el proyecto en curso y asegurarse así que la información ingresada hasta ese momento quede registrada. Este archivo puede recuperarse fácilmente en futuras secciones y facilitar la gestión de múltiples proyectos.

Salir: esta función cierra el programa y finaliza la sesión de trabajo; por ende, asegúrese de guardar los cambios realizados para no perderlos definitivamente.

La Figura 7 detalla la pestaña DEVAP:

Figura 7

Barra de menú: DEVAP



Nota. En el menú hay dos opciones principales que permiten realizar el análisis y ver los resultados obtenidos. Fuente: Programa WinDEPAV 2.6.

Verificar y analizar: esta opción permite efectuar el análisis integral de los datos ingresados. De ese modo, el programa revisa los parámetros y realiza los cálculos correspondientes para evaluar el comportamiento del pavimento en cuanto a fatiga y ahuellamiento se refiere, considerando la estructura y sus capas.

Ver resultados: tras realizar el análisis, esta opción permite visualizar los resultados, lo que es útil para revisar los cálculos y verificar el rendimiento del pavimento según los criterios de daño por tensión y compresión.

La Figura 8 detalla la última pestaña:

Figura 8

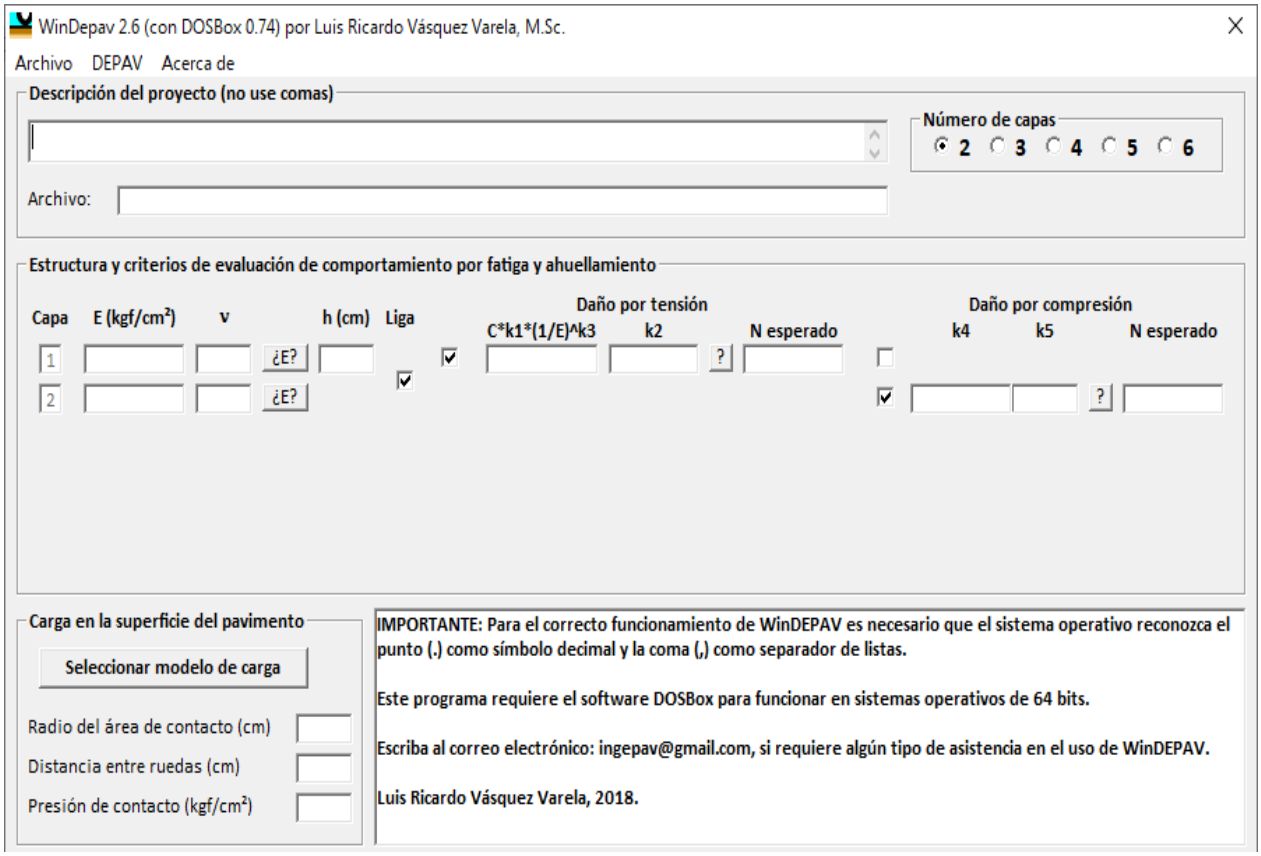
Barra de menú: Acerca de

Nota. El programa creado por Luis Ricardo Vásquez Varela en 2018, quien aparece en la foto, está diseñado para ejecutarse en Windows y se lo utiliza para calcular esfuerzos y deformaciones en sistemas de pavimentos con estructuras de entre dos y seis capas elásticas lineales. Fuente: Programa WinDEPAV 2.6.

Por otro lado, la Figura 9 indica la ventana principal del programa:

Figura 9

Ventana principal WinDEPAV 2.6



Nota. Interfaz principal del software. Fuente: Programa WinDEPAV 2.6.

1) **Descripción del proyecto, no use comas:** en este campo se ingresa una descripción del proyecto en análisis. Debe evitarse el uso de comas porque pueden generarse errores de lectura.
2) **Número de capas:** define la cantidad de capas que conforman la estructura a analizar. El programa permite configurar hasta seis, lo que proporciona flexibilidad para adaptarse a diversos diseños estructurales.

3) **Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y ahuellamiento:** agrupa los parámetros esenciales para evaluar el desempeño del pavimento frente a dos de las principales fallas mecánicas.
    - **Fatiga:** transcurso constante, paulatino y localizado de los cambios de las condiciones del material expuesto a cargas repetidas, lo que produce en consecuencia fisuras o grietas que desembocan en la rotura total del pavimento (Martínez, 2015).
    - **Ahuellamiento:** deterioro paulatino de la superficie que se manifiesta como una ondulación bajo las bandas de circulación vehicular (Caro et al., 2003).
4) **Capa:** corresponde a las capas que forman la estructura del pavimento, las cuales son subbase, base y la de rodadura. Cada una tiene resistencia y durabilidad.
5) **E(Kgf/cm^2):** módulo de cada capa que indica la rigidez o capa del material para deformarse.
6) **V:** coeficiente de poisson este valor explica cómo un material se deforma en direcciones diferentes al aplicársele peso.
7) **H:** consiste en el grosor de las capas medido en centímetros.
8) **Liga:** continuidad y adherencia de las capas entre materiales de esfuerzo vertical, desplazamiento vertical y horizontal y esfuerzo cortante.
9) **Diseño por tensión C k1(1/E) k3, k2:** parámetros usados para calcular la fatiga y el daño estructural de la capa cuando es sometida a tensiones.
10) **Diseño por compresión (k4, k5):** factores que ayudan a evaluar el daño ocasionado por las cargas de compresión.
11) **N esperado**: consiste en el número esperado de repeticiones de carga para la capa.

12) **Carga en la superficie del pavimento**

- **Seleccionar modelo de carga:** debe seleccionarse el tipo o modelo de carga a aplicarse para el análisis del pavimento.

  En la parte inferior hay la opción para definir los propios valores de carga y dimensiones. También, pueden copiarse estos parámetros a la estructura que se está analizando en el programa.
- **Radio del área de contacto** (**cm)**: área donde la rueda del vehículo hace contacto con la superficie del pavimento.
- **Distancia entre ruedas** (**cm)**: es el espacio entre las ruedas, dato muy importante durante el análisis de la distribución de la carga sobre el pavimento.
- **Presión de contacto (kgf/cm²)**: presión que la rueda del vehículo ejerce sobre la superficie del pavimento.

13) **Importante:** recuerde configurar el sistema operativo para reconocer el punto como separador decimal y la coma como separador de listas, en vista de que es esencial para el funcionamiento correcto del programa.

4.2. PARTE 2: INTRODUCCIÓN DE DATOS E INTERPRETACIÓN EN EL SOFTWARE WINDEPAV 2.6

WinDEPAV 2.6 es un software destinado al análisis y diseño de pavimentos flexibles, siendo una herramienta valiosa tanto para ingenieros como para estudiantes de ingeniería. Este programa permite calcular características de los pavimentos, como el espesor adecuado y los materiales necesarios, considerando las condiciones del tráfico y del terreno. Además, realiza cálculo de los esfuerzos y deformaciones en las capas de los pavimentos, información crucial para garantizar un diseño correcto y evitar fallos prematuros (Vásquez, 2018).

WinDEPAV 2.6 efectúa sus diseños de acuerdo con las normativas y estándares locales e internacionales establecidos por organismos de transporte y regulaciones de construcción. Además, esta herramienta facilita simulaciones que permiten visualizar el comportamiento del pavimento bajo diferentes condiciones climáticas, variaciones en el tráfico y tipos de terreno.

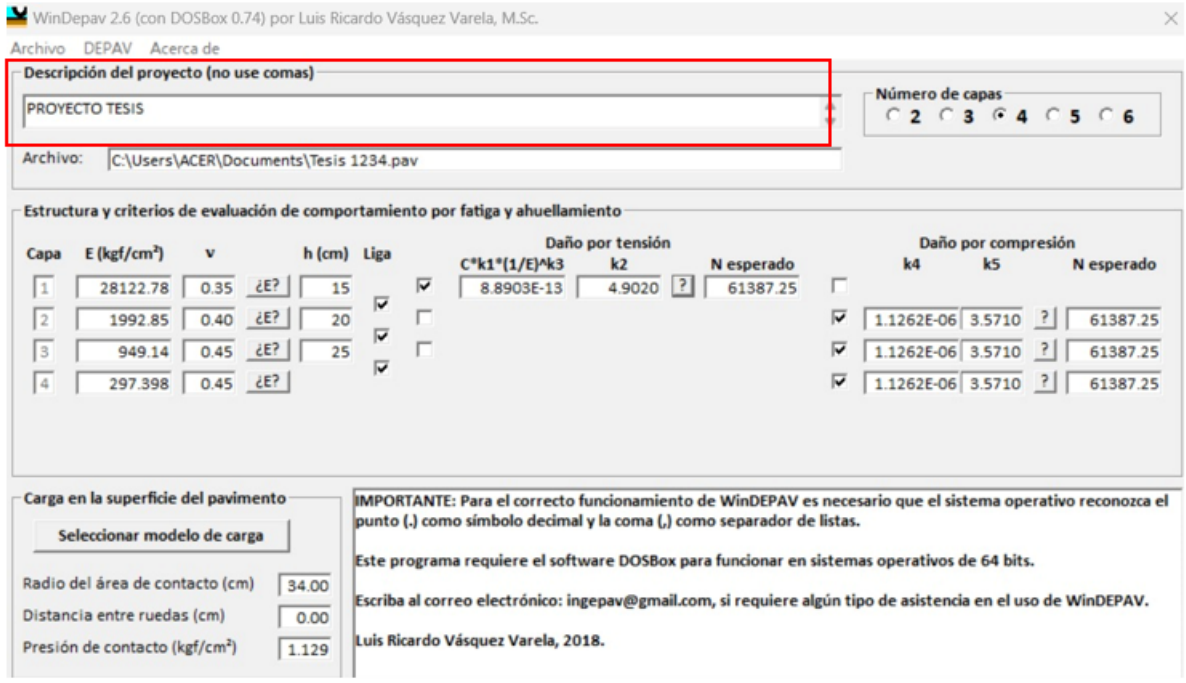
Finalmente, nos ofrece la posibilidad de generar informes detallados que proporcionan información sobre los resultados del diseño y los cálculos realizados (Vásquez, 2018).

WinDEPAV 2.6 es un software aplicable en el diseño de nuevas carreteras y calles, en la rehabilitación de pavimentos y en estudios de viabilidad. Ofrece ventajas como precisión en los diseños, eficiencia en el proceso al automatizar cálculos complejos y la generación rápida de informes. No obstante, al igual que otros programas, es necesario tener conocimientos previos para usarlo adecuadamente y poder interpretar correctamente sus resultados.

La Figura 10 indica la manera de ingresar los datos en la descripción:

Figura 10

Ingreso de datos en descripción del proyecto

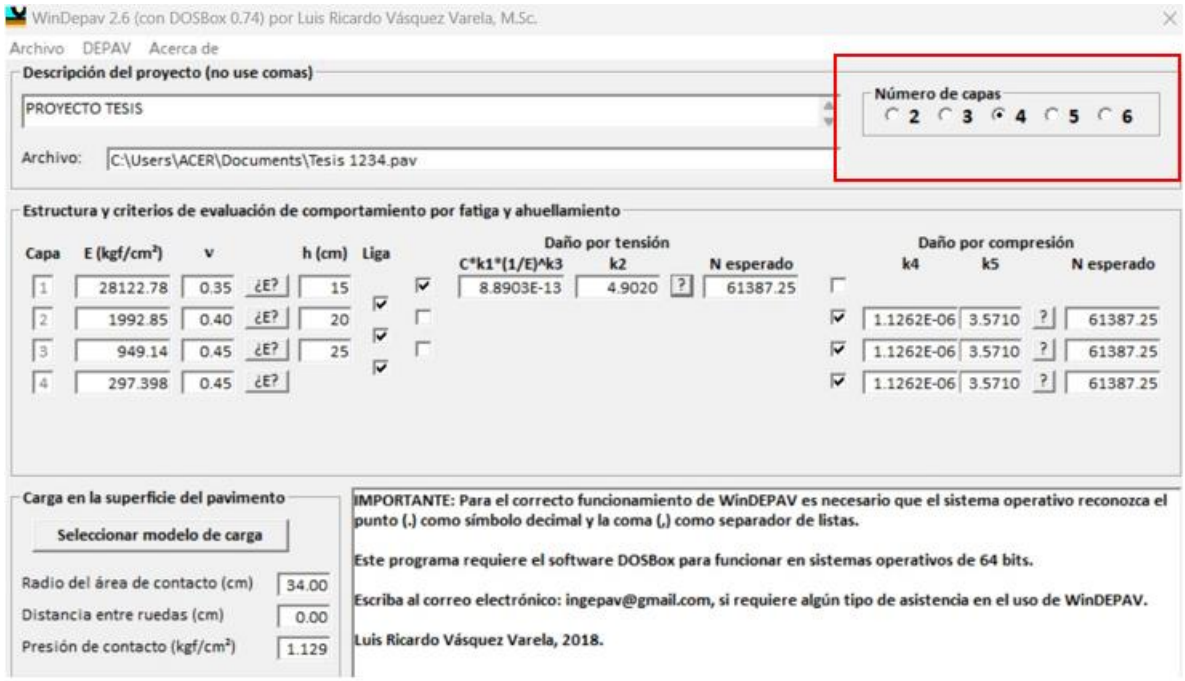


Nota. En este campo se escribe una descripción del proyecto y no debe utilizarse comas para evitar errores en el programa. Fuente: Programa WinDEPAV 2.6.

A continuación, se seleccionan la cantidad de capas (Figura 11):

Figura 11

Número de capas

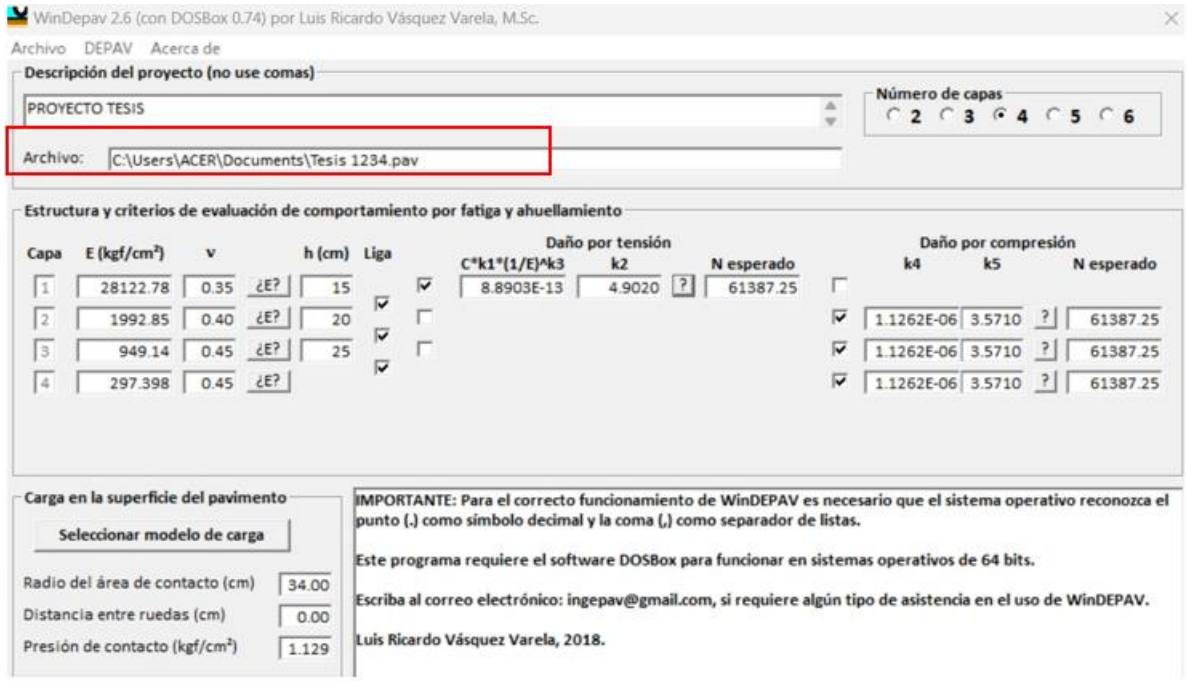


Nota. Seleccione el número de capas que tiene el pavimento flexible. Para efectos del ejemplo se utilizan cuatro: carpeta asfáltica, base, subbase y la subrasante. Fuente: Programa WinDEPAV 2.6.

Luego, se especifica la ubicación del archivo (Figura 12):

Figura 12

Ubicación del archivo

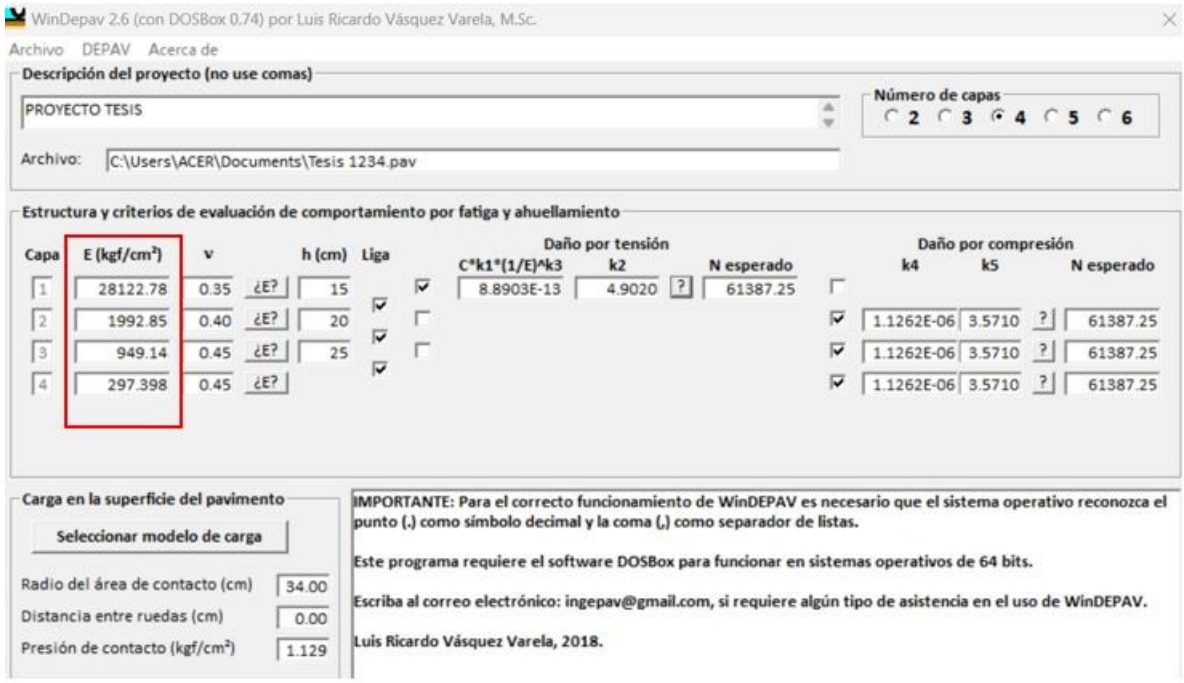


Nota. Indica exactamente la ubicación del archivo en la que se guarda el proyecto. Fuente: Programa WinDEPAV 2.6.

Posteriormente, se ingresan los datos del módulo elástico (Figura 13):

Figura 13

Ingreso de datos del módulo elástico



Nota. Coloque los valores de los módulos elásticos de cada capa en Kgf/cm^2. Fuente: Programa WinDEPAV 2.6.

Transformación de unidades al sistema internacional SI

Módulos de cada capa:

$$Modulo\ del\ asfalto: 400000Psi\ = 28122.783\frac{Kgf}{cm^2}$$

$$Modulo\ de\ la\ base: 28345Psi\ = 1992.85\quad \frac{Kgf}{cm^2}$$

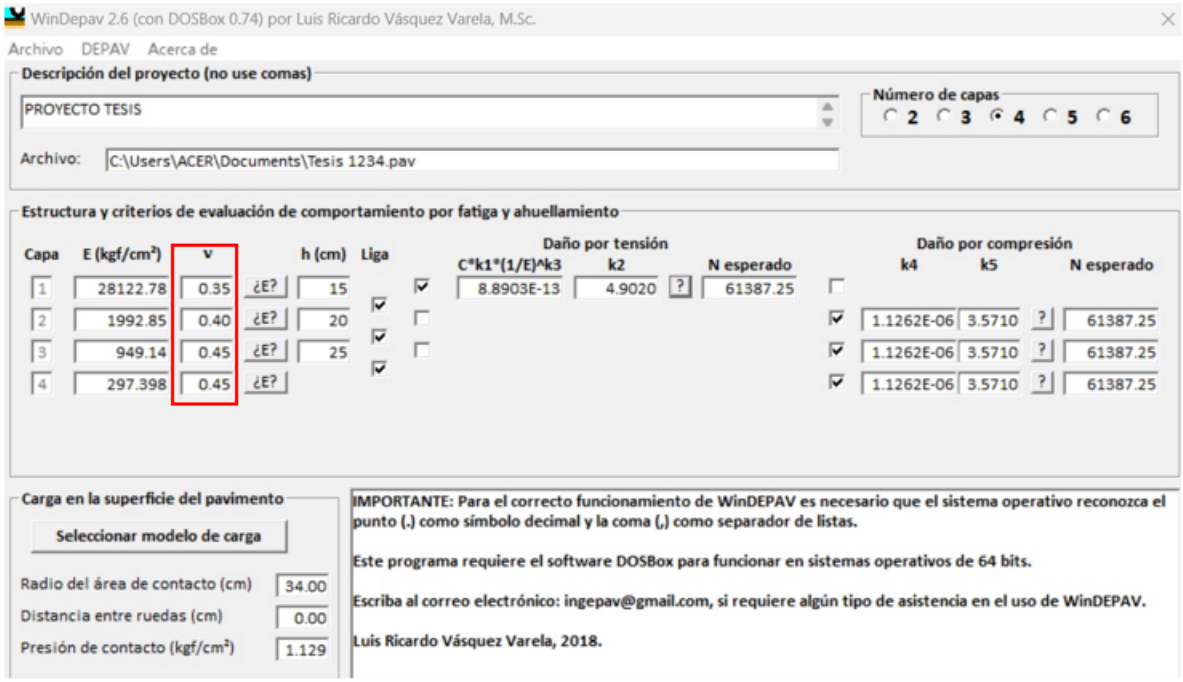
$$Modulo\ de\ la\ Sub-\ base: 13500Psi\ = 949.14\quad \frac{Kgf}{cm^2}$$

$$Modulo\ Resiliente(\ Sub-rasante)\ 4230Psi\ = 297.398\ \frac{Kgf}{cm^2}$$

Ahora, debe configurarse el coeficiente de Poisson (Figura 14):

Figura 14

Coeficiente de Poisson

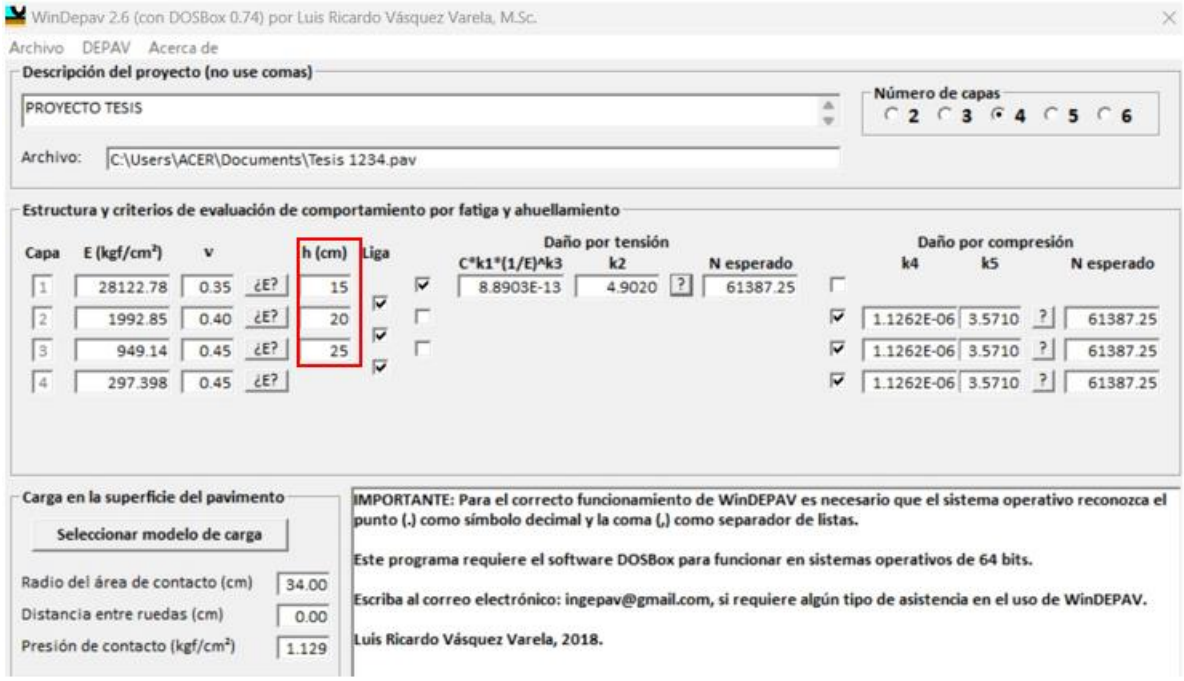


Nota. Asignar la relación de Poisson de cada capa del pavimento. Fuente: Programa WinDEPAV 2.6.

Una vez finalizado este paso, tiene que detallarse los valores de espesor de cada capa (Figura 15):

Figura 15

Espesor de cada capa de pavimento

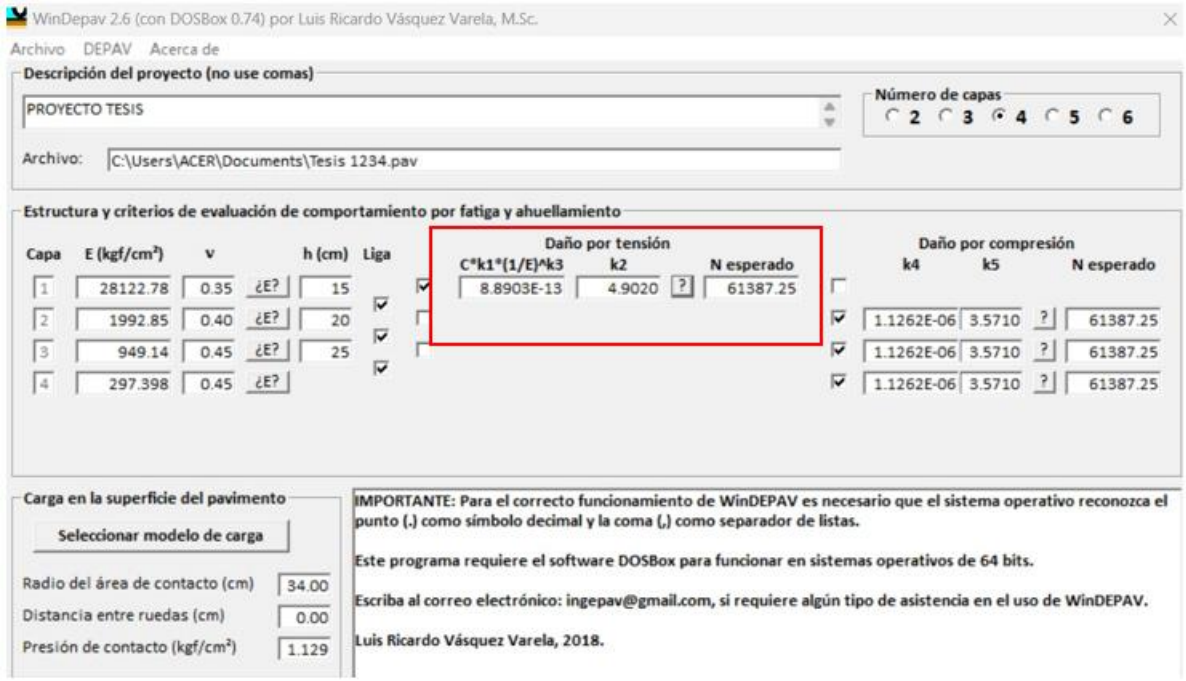


Nota. Introducir los espesores de cada capa. Fuente: Programa WinDEPAV 2.6.

Posteriormente, coloque el daño por tensión (Figura 16):

Figura 16

Daño por tensión



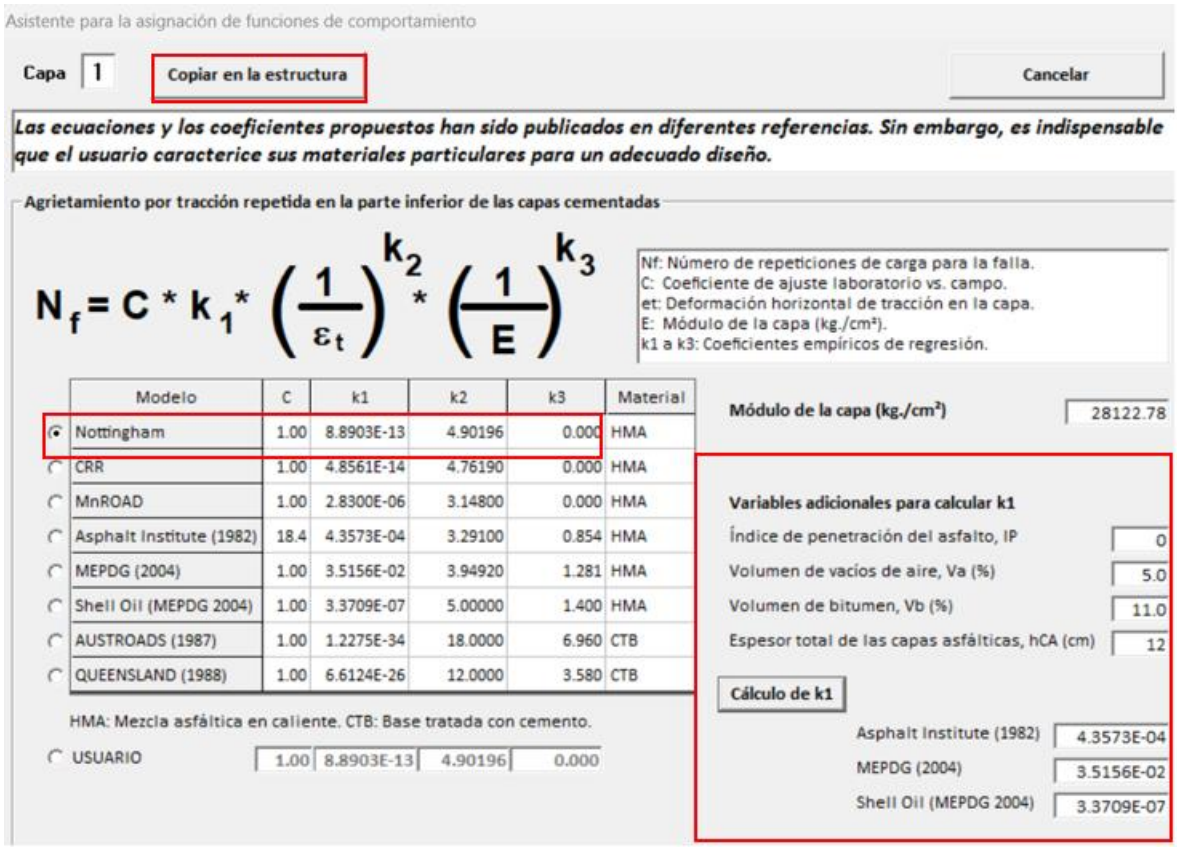
Nota. Factores a seleccionar. Fuente: Programa WinDEPAV 2.6.

Además de definir los parámetros elásticos del pavimento, tiene que evaluarse el comportamiento de fatiga, ahuellamiento y la deformación permanente (Figura 17). En la capa asfáltica se considera el daño por tensión, que está relacionado directamente con el agrietamiento por fatiga.

Al seleccionar la opción correspondiente, se abre una ventana para ingresar las variables necesarias para calcular el coeficiente K1, como el índice de penetración, y es posible elegir un modelo que permita calcular el número de ciclos que la estructura del pavimento puede soportar antes de fallar. Luego, en *N esperado*, tiene que registrarse el valor correspondiente al número de repeticiones esperadas.

Figura 17

Asistente para calcular fatiga

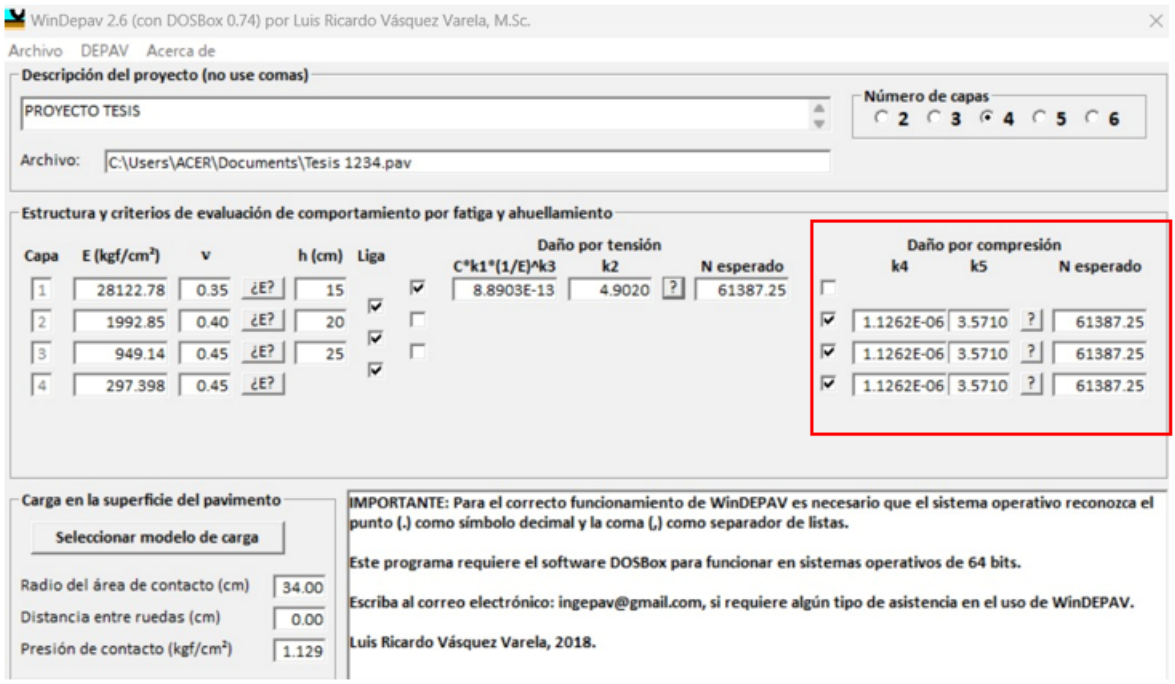


Nota. Haga clic en la opción *Nottingham* y en *Cálculo de k1* para que el programa resuelva los parámetros. Seleccione *copiar en la estructura* para que se copie el modelo. Fuente: Programa WinDEPAV 2.6.

En cuanto al daño por comprensión, la Figura 18 presenta el ejemplo:

Figura 18

Daño por compresión



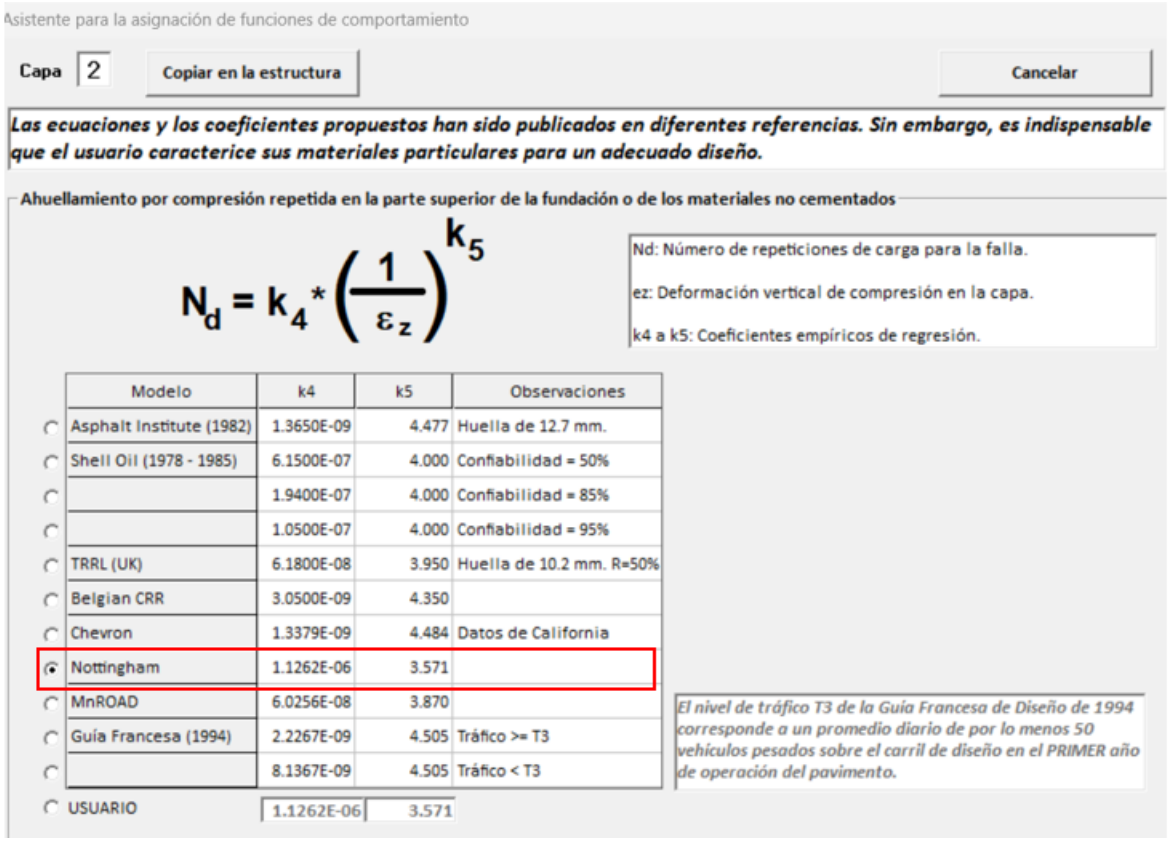
Nota. Factores por compresión a utilizar. Fuente: Programa WinDEPAV 2.6.

Otro aspecto a tomar en cuenta es el daño por compresión, el cual está relacionado con la deformación vertical y que se aplica a las capas que conforman la estructura del pavimento. Para calcular el número de ejes admisibles, según el criterio empleado, el programa incluye una opción que abre una nueva ventana en la que el usuario puede seleccionar el modelo adecuado para determinar el ahuellamiento causado por la compresión repetida. Este proceso facilita la evaluación del comportamiento del pavimento bajo cargas constantes a lo largo del tiempo.

La Figura 19 muestra el asistente para asignación de factores de compresión:

Figura 19

Asistente para la asignación de factores por compresión

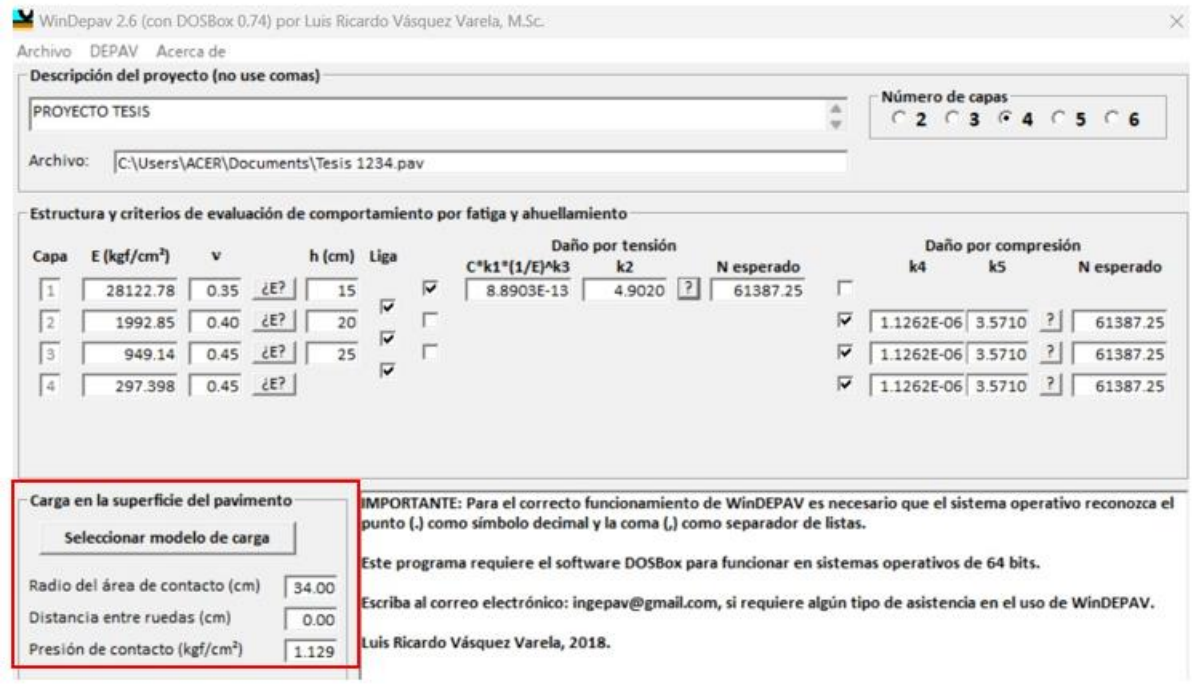


Nota. Seleccione el modelo *Nottingham* para tener un adecuado diseño y haga clic en *copiar en la estructura*. Fuente: Programa WinDEPAV 2.6.

A continuación, la Figura 20 detalla la carga en la superficie del pavimento:

Figura 20

Carga en la superficie del pavimento



Nota. Presione el botón *seleccionar modelo de carga* para configurar un modelo especifico e ingrese los valores correspondientes. Fuente: Programa WinDEPAV 2.6.

Radio del área de contacto (**cm)**: área donde la rueda del vehículo hace contacto con la superficie del pavimento: 34 cm.

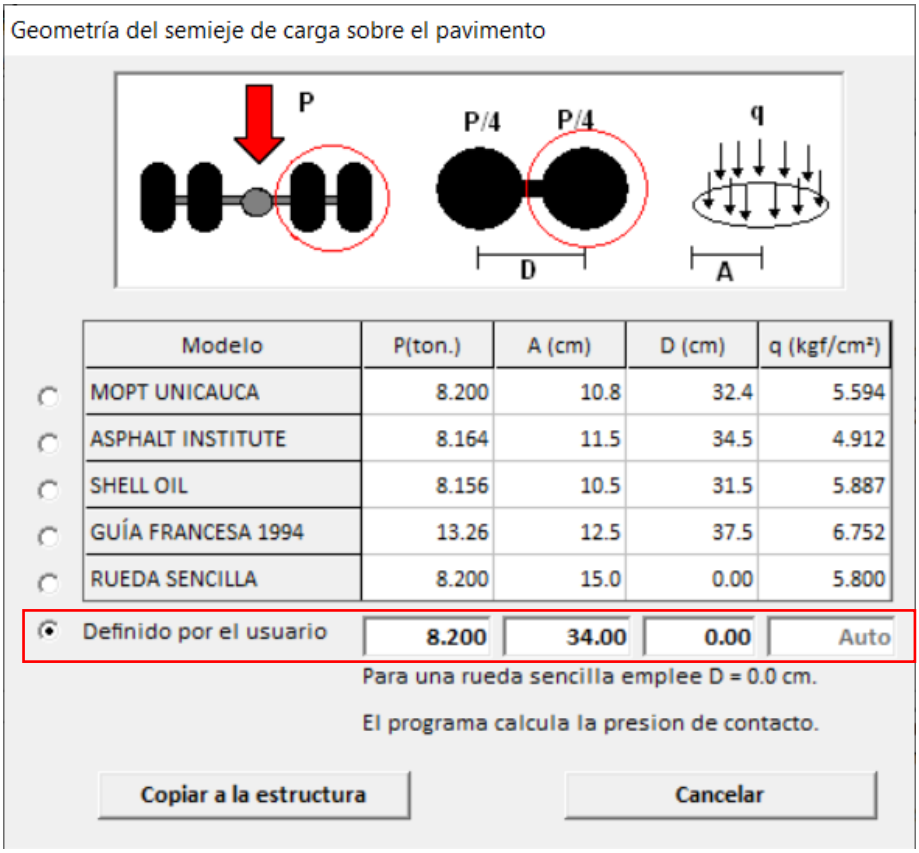
Distancia entre ruedas (**cm**): 0.00 cm para una rueda sencilla. Emplee diámetro 0.

Presión de contacto (kgf/cm²): 1.129 cm. El programa lo calcula.

Por otra parte, la Figura 21 presenta la geometría del semieje de carga sobre el pavimento:

Figura 21

Geometría del semieje de carga sobre el pavimento

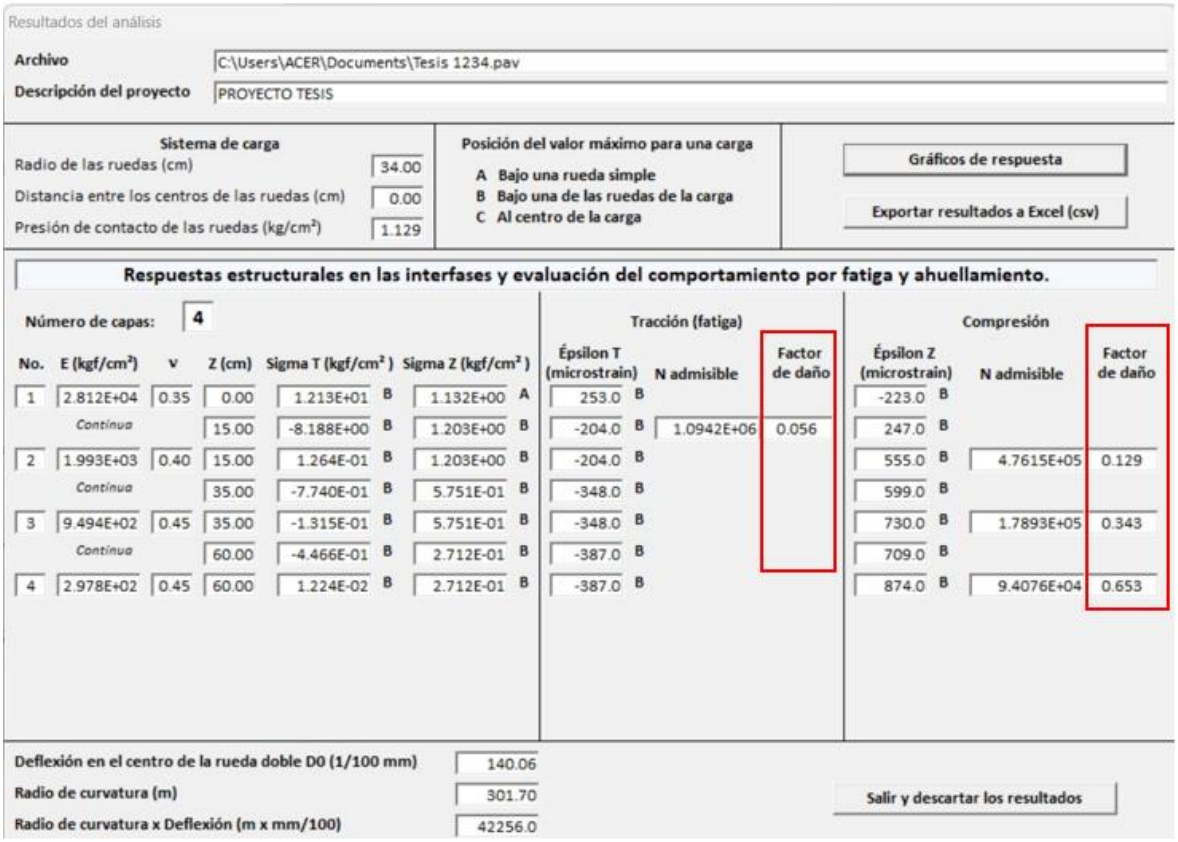


Nota. Seleccione la opción *definida por el usuario*. Si cuenta con valores específicos, como en este proyecto, ingrese los datos correspondientes y haga clic en *copiar a la estructura* para que se ejecuten los resultados. Fuente: Programa WinDEPAV 2.6.

Finalmente, la Figura 22 presenta los resultados del análisis:

Figura 22

Resultados del análisis



Nota. La figura muestra los resultados de los factores generados por fatiga y ahuellamiento. Fuente: Programa WinDEPAV 2.6.

Factor daño: representa la relación entre la carga impuesta y la admisible en el pavimento. El diseño inicial debe iterarse hasta que el factor de todas las capas sea menor o igual a 1, puesto que implica que es satisfactorio; en caso de que sea mayor, el pavimento o cualquiera de los mecanismos evaluados fallarán antes de tiempo. Cabe acotar que deben estar predefinidos los espesores de las capas de pavimento.

Análisis de resultados: WinDEPAV 2.6 permite evaluar al pavimento de acuerdo con criterios de fatiga y ahuellamiento:

- Las capas superiores 1 y 2 evidencian mayor capacidad de resistencia. El daño acumulado en todas las capas es relativamente bajo, lo que respalda la eficacia del diseño estructural para mitigar el agrietamiento por las repeticiones de cargas.
- El daño por compresión se manifiesta con mayor intensidad en las capas inferiores y es particularmente crítico en la capa 4, con un factor de daño de 0.653, lo que indica que la deformación permanente y el ahuellamiento se concentran principalmente allí. Esta capa es la más vulnerable de la estructura del pavimento y el punto de más atención en términos de diseño y mantenimiento.

4.3. PARTE 3: EJEMPLO PRÁCTICO

El ejercicio práctico consiste en diseñar manualmente el pavimento flexible por el método AASHTO-93, dicho método son los más comunes en el cálculo de pavimentos. La Tabla 1 muestra la información del tráfico promedio diario:

Tráfico promedio diario

Incorpora el número promedio de vehículos que circulan por un punto especifico de una vía en un día, clasificado según el tipo de vehículos y diferentes categorías.

Tabla 1

Información tráfico promedio diario

Autos	Buses	Camiones	Tipos de Camiones		
			2 DA	2 DB	3 A
50	3	2	3	1	1

Nota. TPDA según tipo de vehículos al día. Fuente: Chanaluisa y Chandi (2024).

Los datos expuestos a continuación son tomados en cuenta del estudio de Chanaluisa y Chandi (2024):

Tránsito generado por conteo (TG)= 0.16

Tránsito desarrollado por conteo (TD)= 0.07

Tránsito desviado por conteo (Td)= 0.06

La base granular tiene un 82% de CBR una vez compactado

La subbase tiene un 25% de CBR una vez compactado

La base granular tiene un 7% de CBR una vez compactado

Tiene un tiempo de día de drenaje en las capas (base y subbase). (p. 42)

Tasa de crecimiento anual

Indicador que refleja el aumento porcentual promedio anual del tráfico vehicular, considerando tipos de vehículos a lo largo de un periodo de tiempo determinado. Los valores presentados en la tabla 2 corresponden a las tasas de crecimiento de vehículos livianos, buses, camiones, resueltos para intervalos de 5 años.

Tabla 2

Tasa de crecimiento anual

Rango de tiempo	Carros livianos	Buses	Camiones
2012-2017	4.45	3.50	2.25
2017-2022	4.15	3.25	1.96
2022-2027	3.65	2.95	1.68
2027-2032	3.25	2.55	1.26

Nota. Tasa de crecimiento cada cinco años (porcentaje). Fuente: Chanaluisa y Chandi (2024).

La Tabla 3 muestra los datos al tránsito promedio diario anual para la carretera Santa Rosa- Gonzalo Díaz de Pineda, ubicada en el Cantón el Chaco, en esta vía. El tráfico promedio diario es de 166 vehículos en dos carriles, se registra una tasa de crecimiento anual de 4.00% proyectada sobre un periodo de 20 años.

Tabla 3

Información datos TPDA

Carretera Santa Rosa-Gonzalo Díaz de Pineda Tráfico Vehicular en 2 sentidos (EL CHACO)		
TPDA	166	**Veh/día**
TASA	4.00	**%**
PERIODO PROYECTO	20	**Años**

Nota. Recopilación de datos TPDA. Fuente: Chanaluisa y Chandi (2024).

La Tabla 4 presenta la distribución del tráfico vehicular correspondiente en la vía evaluada por el Gad Municipal el Chaco.

Tabla 4

Información porcentaje vehicular

Tipo	Categoría	Vehículos	%
Livianos	2 D	1840	92
Camión 2 ejes medianos	2 DA	80	4
Camión 2 ejes grandes	2 DB	60	3
Camión 3 ejes	3 A	20	1
	∑	2000	100

Nota. Porcentaje vehicular proyectado a un año. Fuente: Chanaluisa y Chandi (2024).

Vehículos livianos 2D representa la mayor cantidad de tráfico con un 92% de total, lo que equivale a 1840 vehículos diarios, indicando que la vía más utilizada es por vehículos livianos.

Camiones de 2 ejes grandes 2DA, aportan el 4% del tráfico total con 80 vehículos diarios, indicando un tráfico moderado relacionado con actividades comerciales o de trasporte local.

Camiones de 2 ejes grandes 2DB, representa el 3% del tráfico a 60 vehículos diarios vehículos que transitan son de carga más pesada.

Camiones 3 ejes 3A, conforman el 1% del tráfico, con 20 vehículos diarios, este porcentaje está relacionado con la baja presencia de trasporte de carga de gran tamaño en la vía.

Tabla 5

Factor de daño según el tipo de vehículos

Tipo	Simple		Simple doble		Tándem		Trídem		Factor Daño
	Ton	$\frac{P^4}{6.6}$	Ton	$\frac{P^4}{8.2}$	Ton	$\frac{P^4}{15}$	Ton	$\frac{P^4}{23}$	
Bus	4	0.13	8	0.91					1.04
2 D	3	0.04							
	4	0.13							0.18
2 DA	3	0.04	7	0.53					0.57
2 DB	7	1.27	11	3.24					4.50
3 A	7	1.27			20	3.16			4.43
	7	1.27			20	3.16			

Nota: Factor de daño según el tipo de vehículos. Fuente: Chanaluisa y Chandi (2024).

Por otro lado, la Tabla 6 presenta el periodo de diseño:

Tabla 6

Periodo de diseño en función del tipo de carretera

Tipo de carreteras	Periodo de Diseño (años)
Urbana de tránsito elevada	30-50
Interurbana de tránsito elevada	20-50
Pavimentada de baja intensidad de tránsito	15-25
De baja intensidad de tránsito, pavimentación con grava	10-20

Nota. Periodo por años. Fuente: American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO, 1993).

El periodo de diseño para este tipo de carretera es de 20 años. No obstante, tomando en cuenta el alto volumen de tránsito vehicular (Tabla 7), el pavimento puede experimentar fatiga o ahuellamiento.

Tabla 7

Tránsito promedio diario de vehículos

Año	Auto	Buses	Camiones	Tipos de camión		
				2 DA	2 DB	3 A
2012	50	3	2	3	1	1
2013	52	3	2	3	1	1
2014	54	4	2	4	1	1
2015	56	4	2	4	1	1
2016	58	4	2	4	1	1
2017	6	4	2	4	1	1
2018	63	5	2	5	1	1
2019	66	5	2	5	1	1
2020	68	5	2	5	1	1
2021	71	5	3	5	1	1
2022	74	5	3	5	2	1
2023	77	6	3	6	2	1
2024	80	6	3	6	2	1
2025	83	6	3	6	2	1
2026	87	6	4	6	3	1
2027	90	6	4	6	3	1
2028	94	7	4	7	3	1
2029	97	7	4	7	3	1
2030	101	7	5	7	4	1
2031	105	7	5	7	4	1
2032	110	8	5	8	4	1

Nota. Tránsito promedio diario. Fuente: Chanaluisa y Chandi (2024).

Con respecto a la tasa de crecimiento anual, la Tabla 8 expone los resultados:

Tabla 8

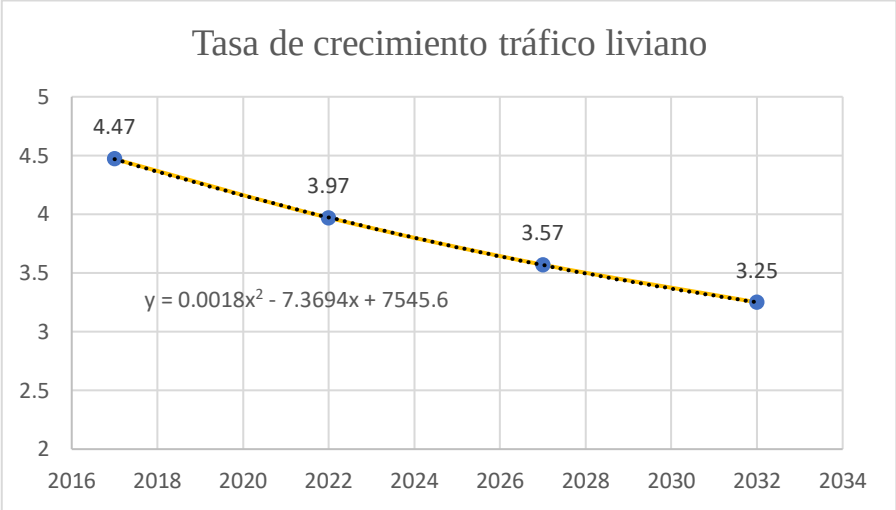
Tasa de crecimiento anual

Rango de tiempo	Livianos	Buses	Camiones
2012-2017	4.47	2.22	2.18
2017-2022	3.97	1.97	1.94
2022-2027	3.57	1.78	1.74
2027-2032	3.25	1.62	1.58

Nota. Crecimiento anual de tráfico para cada periodo de 5 años. Fuente: Normas M.T.O.P. 2003. Por otro lado, la Figura 23 presenta la línea de tendencia para las tasas de crecimiento de tráfico liviano:

Figura 23

Línea de tendencia del tráfico liviano

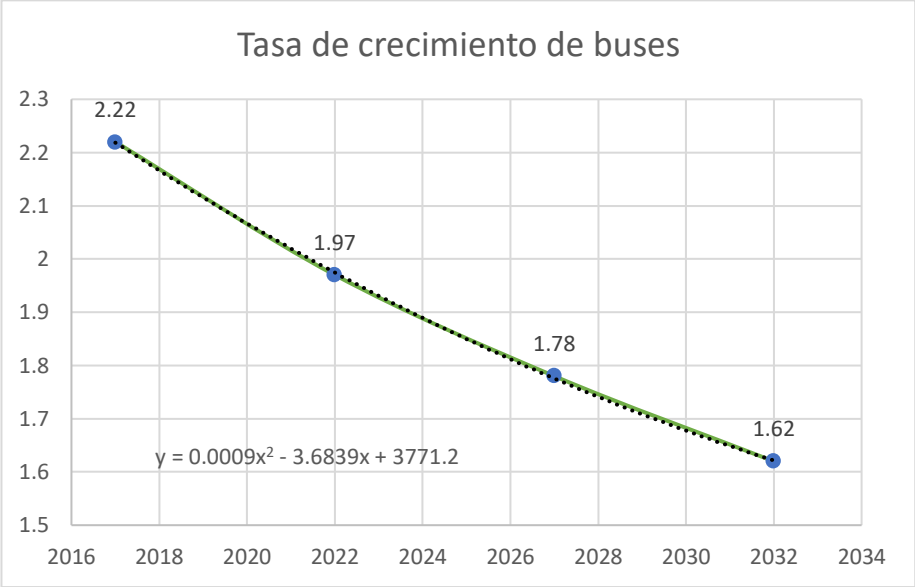


Nota. Tendencia carros livianos. Fuente: Chanaluisa y Chandi (2024).

En cambio, la Figura 24 indica la línea de tendencia para las tasas de crecimiento de tráfico de buses y la Figura 25 corresponde al tráfico de camiones.

Figura 24

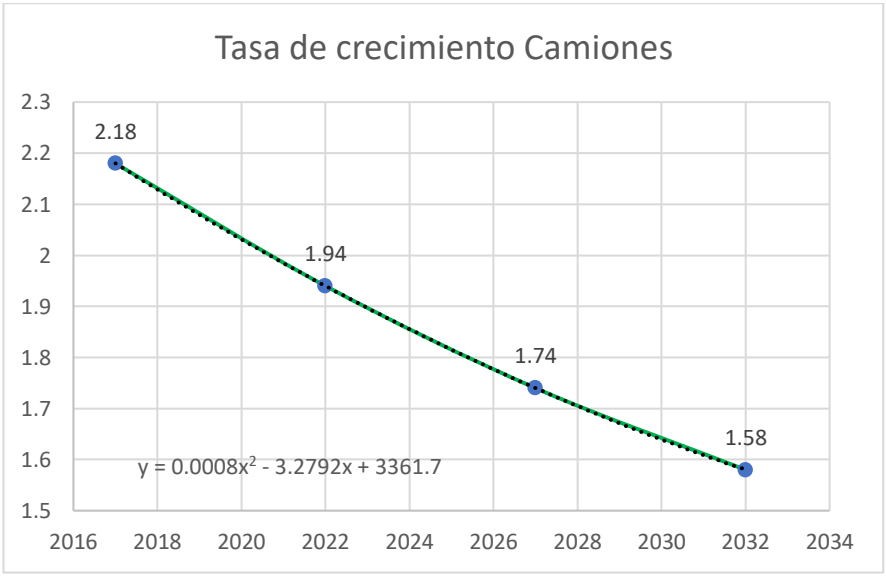
Línea de tendencia del tráfico de buses



Nota. Tendencia buses. Fuente: Chanaluisa y Chandi (2024).

Figura 25

Línea de tendencia del tráfico de camiones



Nota. Línea de tendencia tráfico pesado. Fuente: Chanaluisa y Chandi (2024).

Ahora bien, con el propósito de tener una comprensión fácil de los datos expuestos para el correcto desarrollo del ejemplo práctico, la Tabla 9 resume un cuadro comparativo por periodo de tiempo, años acumulados y el tipo de crecimiento vehicular:

Tabla 9

Tasa de crecimiento vehicular

Tiempo	Total años	Livianos	Bus	Pesados
2012-2017	5	4.47	2.22	2.18
2017-2022	10	3.97	1.97	1.94
2022-2027	15	3.57	1.78	1.74
2027-2032	20	3.25	1.62	1.58
2032-2037	25	3.03	1.51	1.46
2037-2042	30	2.89	1.45	1.38
2042-2047	35	2.84	1.43	1.34

Nota. Línea de tendencia generada de cada vehículo. Fuente: Chanaluisa y Chandi (2024).

Por otra parte, en cuanto al tráfico promedio semanal de ambos sentidos de la vía, la Tabla 10 muestra los resultados:

Tabla 10

Tráfico promedio semanal dos sentidos

Días	Tipo de vehículo			TPDA
	Livianos	Buses	Camiones	(Veh/día)
Lunes	87	2	6	95
Martes	77	1	2	80
Miércoles	90	2	2	94
Jueves	72	3	2	77
Viernes	68	0	8	76
Sábado	65	2	8	75
Domingo	65	0	6	71
Promedio	37	1	2	40

Nota. Tráfico promedio semanal. Fuente: Chanaluisa y Chandi (2024).

Ahora bien, el siguiente paso consiste en calcular el tráfico futuro:

1) Vehículos livianos

$$TPDAL\ prom = 37 \frac{vehículos}{día}$$

$$TG = 20\% * TPDALprom$$

$$TG = 0.20 * 37 = \frac{7\ vehículos}{día}$$

Donde:

TG: tráfico generado.

TPDALprom: tráfico promedio diario anual livianos promedio.

Con respecto al tráfico atraído se calcula de la siguiente forma:

$$AT = 10\%\ TPDAL\ prom$$

$$AT = 0.10 * 37$$

$$AT = 4 \frac{vehículos}{día}$$

Donde:

AT: tráfico atraído

El cálculo del tráfico desarrollado es el siguiente:

$$TD = 5\% * TPDAL\ prom$$

$$TD = 0.05 * 37$$

$$TD = 2\ \frac{vehículos}{día}$$

Donde:

TD: tráfico desarrollado

Por último, el cálculo de tráfico futuro responde a la siguiente ecuación:

$$Trafico\ futuro\ L = TPDAL\ prom + TG + AT + TD$$

$$Trafico\ futuro\ L = 37 + 7 + 4 + 2$$

$$Trafico\ futuro\ L = \frac{50\ vehículos}{día}$$

$$Trafico\ futuro\ L = \frac{50}{2}$$

$$Trafico\ futuro\ L = 25\frac{vehículos}{día}$$

$$25\frac{vehículos}{día}\ en\ un\ carril$$

2) Vehículos pesados

$$TPDA\ prom = \frac{4\ vehículos}{día}$$

$$TG = 20\% * TPDAL\ prom$$

$$TG = 0.20 * 4$$

$$TG = 1\ vehículo/día$$

Donde:

TG: tráfico generado

TPDALprom: tráfico promedio diario anual livianos promedio

El cálculo del tráfico atraído es el siguiente:

$$AT = 10\%\ TPDAL\ prom$$

$$AT = 0.10 * 4$$

$$AT = 0\frac{vehículos}{día}$$

Donde:

AT: tráfico atraído

Por su parte, el cálculo del tráfico desarrollado consiste en:

$$TD = 5\% * TPDAL\ prom$$

$$TD = 0.05 * 4$$

$$TD = 0\frac{vehículos}{día}$$

Donde:

TD: tráfico desarrollado

Finalmente, el tráfico futuro responde a la siguiente ecuación:

$$Trafico\ futuro\ L = TPDAL\ prom + TG + AT + TD$$

$$Trafico\ futuro\ L = 4 + 1 + 0 + 0$$

$$Trafico\ futuro\ L = 5\frac{vehículos}{día}$$

$$5\frac{vehículos}{día}\ en\ un\ solo\ carril$$

Se considera el volumen de tráfico para un diseño que contempla máximo 20 años y en función de las características propias de la vía.

Por otro lado, el cálculo total de vehículos se detalla en la Tabla 11:

Tabla 11

Cálculo total de vehículos para el diseño

Tipo de Vehículo	Tráfico total	Factor conversión	Vehículo diseño
Livianos	37	0.5	19
Buses	1	1	1
Camiones	2	1.5	3
Tráiler	0	2.5	0
		∑	23

Nota. Cálculo de vehículos con factor de corrección. Fuente: Chanaluisa y Chandi (2024).

Con respecto al cálculo de porcentaje de crecimiento, la Tabla 12 expone la información:

Tabla 12

Crecimiento del tráfico para 20 años

Año	% crecimiento			Tráfico promedio diario anual		
	Liviano	Bus	Camión (C-2-P)	Liviano	Camión (C-2-P)	Total
2012	4.00	3.50	5.00	50	5	55
2013	4.00	3.50	5.00	52	5	57
2014	4.00	3.50	5.00	54	6	60
2015	4.00	3.50	5.00	56	6	62
2016	4.00	3.50	5.00	58	6	64
2017	4.00	3.50	5.00	61	6	67
2018	4.00	3.50	5.00	63	7	70
2019	4.00	3.50	5.0	66	7	73
2020	4.00	3.50	5.00	68	7	75
2021	4.00	3.50	5.00	71	8	79
2022	4.00	3.50	5.00	74	8	82
2023	4.00	3.50	5.00	77	9	86
2024	4.00	3.50	5.00	80	9	89
2025	4.00	3.50	5.00	83	9	92
2026	4.00	3.50	5.00	87	10	97
2027	4.00	3.50	5.00	90	10	100
2028	4.00	3.50	5.00	94	11	105

2029	4.00	3.50	5.00	97	11	108
2030	4.00	3.50	5.00	101	12	113
2031	4.00	3.50	5.00	105	12	117
2032	4.00	3.50	5.00	110	13	123

Nota. Tráfico proyectado 20 años. Fuente: Chanaluisa y Chandi (2024).

Ahora bien, para el cálculo de tráfico futuro se emplea fórmulas según el periodo de diseño:

Periodo de diseño 10 años

- Vehículos livianos

$$TP = Ta * (1 + i)^n$$

$$TP1 = 50 * (1 + 4\%)^{10}$$

$$TP1 = 74 \frac{vehículo}{día}$$

Donde:

n: periodo en años tiempo de diseño.

TP: tráfico proyectado.

I: porcentaje de crecimiento.

Ta: tráfico futuro livianos.

- Vehículos pesados

$$TP2 = Ta * (1 + i)^n$$

$$TP2 = 5 * (1 + 4\%)^{10}$$

$$TP2 = 7 \frac{vehículo}{día}$$

Periodo de diseño 20 años

- Vehículos livianos

$$TP1 = Ta * (1 + i)^n$$

$$TP1 = 50 * (1 + 4\%)^{20}$$

$$TP1 = 133 \frac{Vehículos}{día}$$

- Vehículos pesados

$$TP2 = Ta * (1 + i)^n$$

$$TP2 = 5 * (1 + 4\%)^{10}$$

$$TP2 = 13 \frac{Vehículos}{día}$$

- Vehículos pesados

$$TP3 = Ta * (1 + i)^n$$

$$TP3 = 13 * (1 + 5\%)^{10}$$

$$TP3 = 34 \frac{Vehículos}{día}$$

$$TP = TP1 + TP3$$

$$TP = 133 + 34$$

$$TP = 167 \frac{vehículos}{día}$$

Por otra parte, la Tabla 13 presenta el cálculo total de vehículos según el diseño de tráfico futuro:

Tráfico total futuro

Es una proyección del volumen de tráfico vehicular que se espera en un periodo determinado en el futuro, considerando el crecimiento anual del tránsito vehicular, estimar el impacto del crecimiento del tráfico en el desgaste y mantenimiento de las carreteras.

Tabla 13

Tráfico total futuro

Tipo de Vehículo	Tráfico Total	Factor Conversión	Vehículo Diseño
Livianos	110	0.5	55
Buses	6	1	6
Camiones	13	1.5	20
Trailers	0	2.5	0
		∑	81

Nota. Tráfico de diseño futuro. Fuente: Chanaluisa y Chandi (2024).

Factor de daño

Con relación a los factores de daño, la Tabla 14 presenta los datos:

Tabla 14

Factores de daño

Factores de daño según tipo de vehículo									
Tipo	**Simple**		**Simple doble**		**Tridem**		**Tridem**		**Factor daño**
	Ton	**(P/6.6)^4**	**ton**	**(P/8.2)^4**	**ton**	**(P/15)^4**	**ton**	**(P/23)^4**	
BUS	4.0	0.13	8.0	0.91					1.04
C-2P	2.5	0.02							1.29
	7.0	1.27							
C-2G	6.0	0.68	11.0	3.24					3.92
C-3	6.0	0.68			18	2.07			2.76
C-4	6.0	0.68					25	1.40	2.08
C-5	6.0	0.68			18	2.07			2.76
C-6	6.0	0.68			18	2.07	25	1.40	4.16

Nota. Factores de Daño (FD). Fuente: Dirección de Mantenimiento Vial del MTOP.

Factor sentido o de distribución direccional (Fd)

La distribución del flujo vehicular consiste en la proporción total de vehículos que transitan en cada dirección de la vía. En términos generales, la AASTHO (1993) sugiere considerar 0.5 como la mitad del flujo que está en camino hacia cada una de las direcciones.

Este factor se utiliza para el análisis de capacidad y dimensionamiento de carriles en vías bidireccionales, autopistas y carreteras, si el flujo vehicular es unidireccional durante ciertas horas del día, el FD será mayor para esa dirección.

Un FD elevado en una dirección especifica puede señalar la necesidad de implementar soluciones de diseño como carriles adicionales para adelantamientos, carriles reversibles o incluso aumentar la capacidad de la vía, con el objetivo de mejorar el flujo vehicular.

Según la AASTHO 93, el FD también puede variar en función de factores como el día de la semana y la ubicación geográfica.

Factor Carril (Fc)

El carril de diseño es aquel que recepta la mayor cantidad de carga por eje equivalente (ESALs). Además, en vías de doble carril, cualquiera puede concebirse como tal, puesto que el tránsito se distribuye obligatoriamente entre ambos.

Tabla 15

Factor carril (Fc)

Número de carriles de cada dirección	% ejes equivalentes 8.2 t en el carril de diseño
1	1.00
2	0.80 – 100
3	0.60 - 0.75
4 o más	0.50 – 0.75

Nota. Factor carril. Fuente: AASHTO (1993).

Cálculo de ejes equivalentes

Conocidos como Esal´s, ejes equivalentes es un proceso técnico que requiere una comprensión clara del eje y peso, estos factores afectan directamente el desempeño del pavimento. A partir de los valores de los diferentes tipos de vehículos obtenidos de la composición del tráfico, se realiza la conversión a ejes equivalentes cargas.

Permite conocer las diversas configuraciones de ejes que transitan por una vía en un sistema de ejes simples. Para variable de carga, se puede emplear los pesos definidos por el MTOP o los registrados mediante un sistema de pesaje vehicular, lo que asegura un cálculo más preciso y adaptado a las locales.

Tabla 16

Cálculo total de vehículos de diseño

Tipo de vehículo	Tráfico total	Factor conversión	Vehículo diseño
Livianos	50	0.5	25
Buses	0	1	0
Camiones	5	1.5	8
Tráiler	0	2.5	0
		∑	33

Nota. Tráfico de diseño futuro. Fuente: Chanaluisa y Chandi (2024).

Por otra parte, la Tabla 17 expone el cálculo de ejes equivalentes W18:

Tabla 17

Cálculo ejes equivalentes 8.2 ton (W18)

Año	Parcial	Acumulado	Un carril
2012	15538	15538	7769
2013	16009	31547	15774
2014	16951	48498	24249
2015	17421	65919	32960
2016	17892	83811	41906
2017	18834	102645	51323
2018	19776	122421	61211
2019	20247	142668	71334
2020	21188	163856	81928
2021	22130	185986	92993
2022	22601	208587	104294
2023	23543	232130	116065
2024	24484	256614	128307
2025	25897	282511	141256
2026	26368	308879	154440
2027	27309	336188	168094
2028	28722	364910	182455
2029	29664	394574	197287
2030	31076	425650	212825
2031	32018	457668	228834
2032	33430	491098	245549

Nota. Cálculo W18 un solo carril. Fuente: Chanaluisa y Chandi (2024).

Parámetros fundamentales para el diseño de pavimentos flexibles mediante AASTHO-93

1) Confiabilidad

La confiabilidad toma en consideración el nivel de incertidumbre en el proceso de estimación de las variables de diseño.

Tabla 18

Niveles recomendados de confiabilidad

Tipo de carretera	Urbana	Rural
Autopistas	85-99.9	80-99.9
Troncales	80-99	75-95
Colectores	80-95	75-95
Ramales y vías Agrícolas	50-80	50-80

Nota. valores de confiabilidad recomendados. Fuente: AASHTO (1993).

El nivel de confianza recomendado es de 80 % por ser tipo de carretera troncal.

2) Desviación estándar (ZR)

La ZR es determinada en función del nivel de confiabilidad, el cual depende del volumen de tráfico establecido. En ese sentido, la Tabla 19 presenta los valores correspondientes:

Tabla 19

Factores de desviación normal

Confiabilidad (R %)	Desviación normal estándar Zr
50	0.000
60	-0.253
70	-0.524
75	-0.674
80	-0.841
85	-1.037
90	-1.282
91	-1.340
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

Nota. ZR para el nivel de Confiabilidad. Fuente: AASHTO (1993).

3) Error normal combinado (So)

Este factor considera la desviación del diseño, así como las distintas características de los materiales y la subrasante, condiciones ambientales y el cálculo del tráfico.

Por otro lado, la Tabla 20 presenta la desviación estándar (So) según el escenario del diseño:

Tabla 20

Desviación estándar recomendada

Valor	Tipo de pavimento
0.30-0.50	Pavimentos rígidos
0.40-0.50	Pavimentos flexibles
0.45 valor recomendado para el diseño a realizar	

Nota. Valores recomendados So. Fuente: AASHTO (1993).

4) Serviciabilidad

Consiste en el índice de servicio que tiene la vía con respecto al usuario y se evalúa entre 0 y 5 la norma AASTHO-93 se sugiere lo siguiente:

- **Serviciabilidad inicial:** aquella que cuenta con un pavimento inmediatamente después de su construcción:
  - Po: 4.5 cuando son de tipo rígido
  - Po: 4.2 cuando son de tipo flexible
- **Serviciabilidad final:** condición del pavimento al final de su vida útil:
  - Pt: 4.5 para pavimentos rígidos
  - Pt: 2.0 para caminos de tránsito menor

La variación de serviciabilidad se apega a la siguiente ecuación:

$$(\Delta\text{PSI}) = \text{PSI}inical - \text{PSI}\ final$$

Donde:

(ΔPSI): variación de serviciabilidad inicial y final

Po: serviciabilidad inicial

Pt: serviciabilidad final

$$(\Delta\text{PSI}) = \text{PSI}inical - \text{PSI}\ final$$

$$\Delta\text{PSI} = 4.2 - 2$$

$$\Delta\text{PSI} = 2.2$$

CBR de diseño

Parámetro utilizado para evaluar la capacidad de resistencia del suelo o material base, lo que permite determinar si el material es adecuado para soportar el tráfico previsto durante la vida útil del pavimento.

El CBR de diseño determina el análisis de ensayos de laboratorio sobre estratos de suelos, este valor considera los niveles de tráfico esperados, en pavimentos flexibles el CBR es esencial ya que sirve como base para calcular los espesores de capa garantizando que la estructura pueda resistir las cargas vehiculares sin deformarse.

Tabla 21

Resistencia del diseño

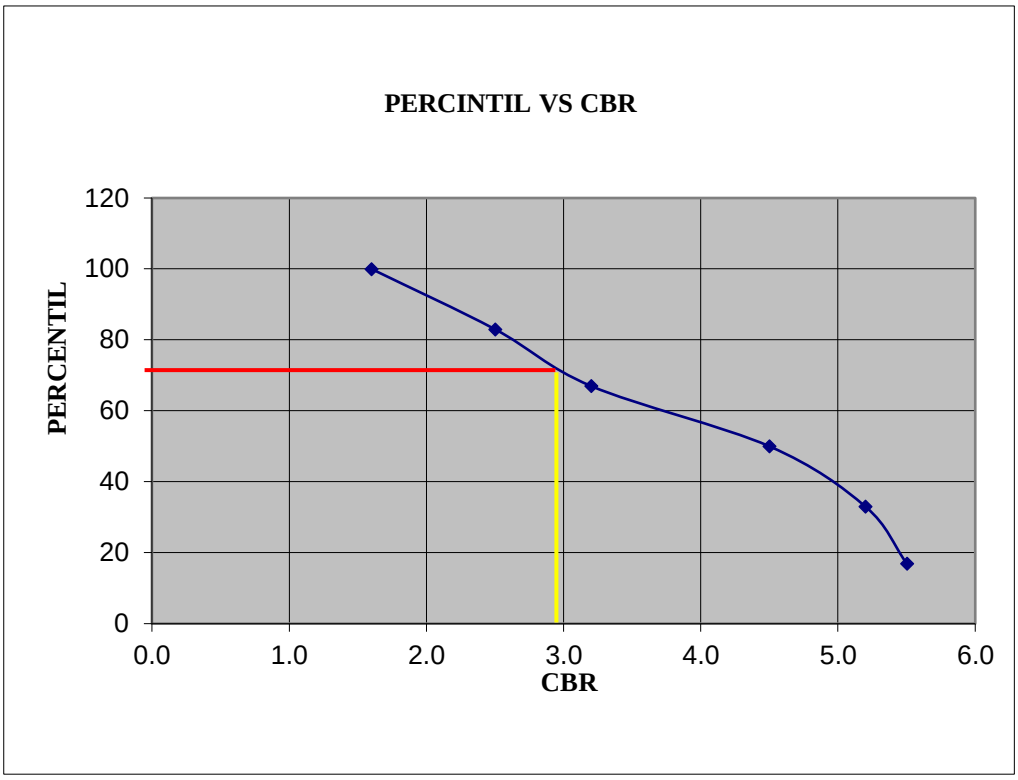
Abscisa	CBR	CBR Asc.	Datos iguales	Percentil
0+000	1.6	1.6	6	100
0+001	5.5	2.5	5	83
0+002	5.2	3.2	4	67
0+003	4.5	4.5	3	50
0+004	3.2	5.2	2	33
0+005	2.5	5.5	1	17

Nota. Valores obtenidos de los ensayos. Fuente: Chanaluisa y Chandi (2024).

A continuación, la Figura 26 muestra el percentil vs CBR:

Figura 26

Percentil vs CBR



Nota. Determinación del CBR. Fuente: Chanaluisa y Chandi (2024).

CBR de diseño: 2.82

Porcentaje de diseño: 75 %

Por otra parte, la Tabla 22 detalla el percentil de resistencia del suelo:

Tabla 22

Percentil de resistencia del suelo

Número de ejes de 8.2 Ton para el carril de diseño	**Percentil para hallar la resistencia del suelo**
<10^4	60%
10^4-10^6	75%
>10^6	87.5%

Nota. El percentil depende de la cantidad de ejes equivalentes de 8.2 toneladas que transitarán por la vía. Fuente: AASHTO (1993).

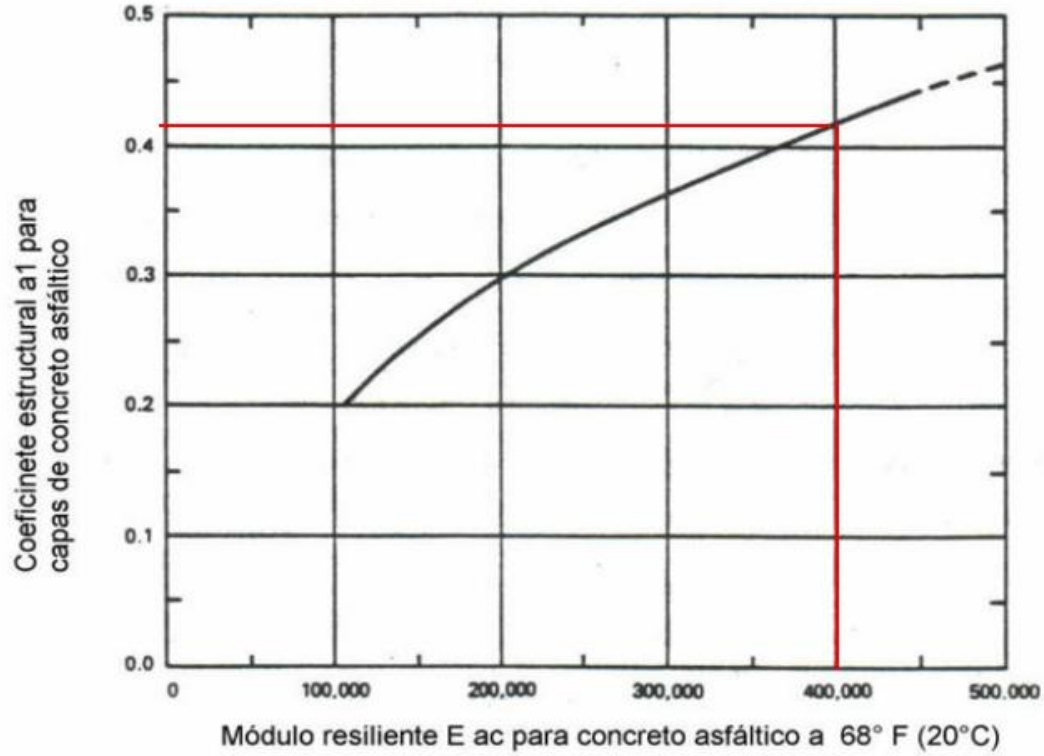
Propiedades de los materiales

1) Coeficiente estructural de la capa asfáltica (a1)

De acuerdo con la norma AASTHO, la Figura 27 presenta una relación que permite calcular el coeficiente estructural a1.

Figura 27

Gráfico para determinar el coeficiente estructural a1



Nota. Detalle para determinar el coeficiente estructural del concreto asfaltico. Fuente: AASHTO (1993).

Entonces, se determinaron los siguientes valores:

- Módulo resiliente de concreto asfaltico

  $400000\ Psi\ 400Ksi$

- Coeficiente estructural

  $a1 = 0.418$

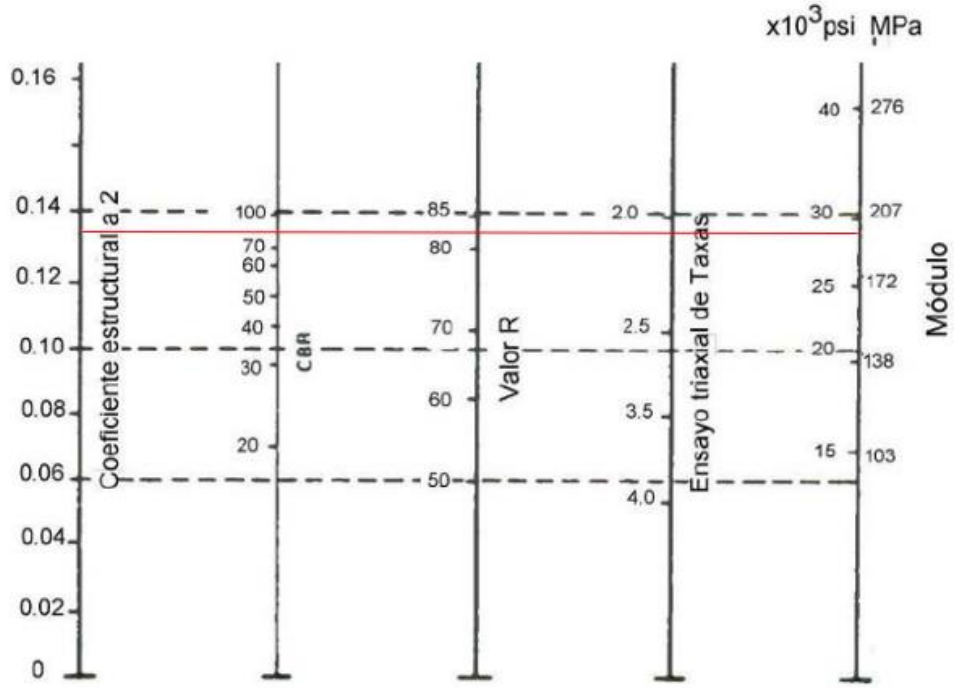
2) Coeficiente estructural de la base granular (a2)

El MOP indica que el CBR de la capa base debe ser mínimo del 80 % para asegurar que soporte y distribuya las cargas del tránsito. En este caso, El CBR es de 82 %.

A continuación, la Figura 28 presenta el monograma para determinar el coeficiente estructural de la base granular (a2):

Figura 28

Monograma para determinar el coeficiente estructural



Nota. Detalle del monograma. Fuente: AASHTO (1993).

En vista de que el CBR es del 82 % se obtuvieron los siguientes datos:

$$MR = 28345\ psi$$

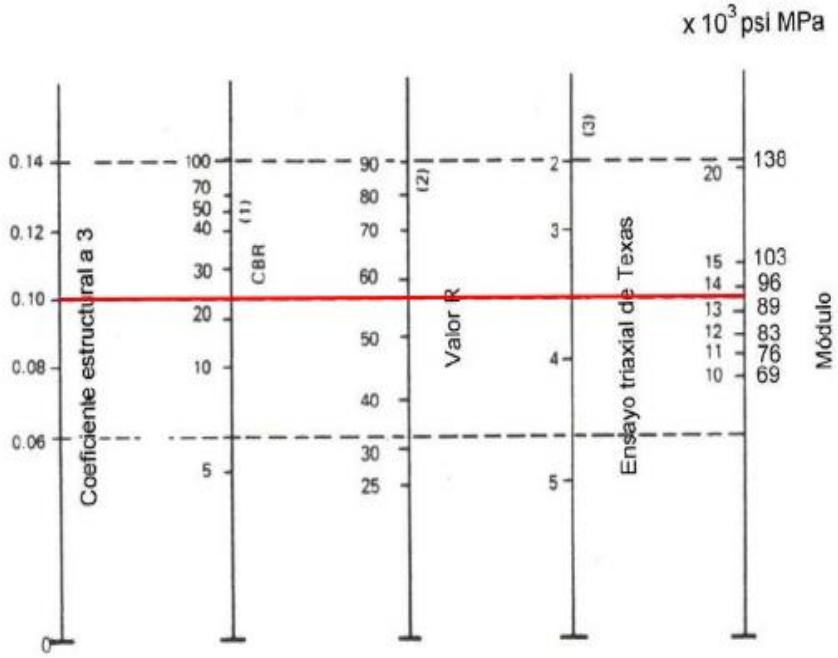
$$MR = 0.134$$

3) Coeficiente estructural de la Subbase (a3)

El MOP-001-F 2002 (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, 2002) indica que el CBR debe ser de al menos el 30 %; caso contrario, tiene que tratarse con asfalto, cal o cemento. Para efectos del ejemplo, el CBR es de 25 % (ver Figura 29).

Figura 29

Coeficiente estructural para subbase granular



Nota. Relación del coeficiente estructural. Fuente: AASHTO (1993).

A partir del CBR del 25 % se obtuvieron los siguientes datos:

$$MR = 13500\ psi$$

$$a3 = 0.10$$

4) Condiciones de drenaje

El coeficiente está determinado por la eficiencia del sistema de drenaje (medida en función del tiempo necesario para evacuar el agua acumulada en el pavimento) y el porcentaje de tiempo anual de que el pavimento está expuesto a grados de humedad próximos a saturación. Cabe aclarar que esta tasa varía según la humedad atmosférica media anual y las características del drenaje.

La AASTHO-93 clasifica las capacidades de drenaje en cinco niveles, tal como lo indica la Tabla 23:

Tabla 23

Capacidad de drenaje del material

Calidad	Tiempo de remoción de agua
Excelente	Dos horas
Buena	Un día
Regular	Una semana
Pobre	Un mes
Muy pobre	El líquido no puede drenarse

Nota. Tiempos de drenaje recomendados por AASTHO. Fuente: AASHTO (1993).

En función de la capacidad de drenaje, la ASSTHO-93 proporciona los factores de corrección m^2 para bases y m^3 para subbases granulares sin estabilizar, cada uno detallado en la Tabla 24:

Tabla 24

Coeficientes de drenaje para pavimentos flexible

Calidad de drenaje	Porcentaje de tiempo de exposición del pavimento a grados de humedad cercanos a la saturación			
	<1%	1%-5%	5%-25%	>25%
Excelente	1.25-1.20	1.20-1.15	1.15-1.10	1.10
Buena	1.20-1.15	1.15-1.10	1.10-1.00	1.00
Regular	1.20-1.15	1.10-1.00	1.00-0.90	0.90
Pobre	1.10-1.00	1.00-0.90	0.90-0.80	0.80
Muy pobre	1.00-0.90	0.90-0.80	0.80-0.70	0.70

Nota. El coeficiente se asigna de acuerdo con la calidad de drenaje y el porcentaje de lluvias durante el año. Fuente: AASHTO (1993).

Resultados para calcular el diseño de pavimento

La Tabla 25 presenta los datos:

Tabla 25

Resumen de datos calculados

Categoría	Parámetro	Unidad	Valor
Datos generales	Tipo de pavimento	-	Flexible
	Periodo de Diseño	Años	20
Propiedades de los materiales	CBR de diseño de la subrasante	%	2.82
	Módulo de Resiliencia del asfalto	Psi	400000
	Módulo de Resiliencia de la base	Psi	28345
	Módulo de Resiliencia de la subbase	Psi	13500
	Módulo de Resiliencia de la subrasante	Psi	4230
Factores estructurales	Coeficiente estructural de la capa asfáltica a1	-	0.418
	Coeficiente estructural	-	0.134

	de la base a2		
	Coeficiente estructural subbase a3	-	0.100
Factores de diseño	Serviciabilidad Inicial	Psi	4.2
	Serviciabilidad Final	Psi	2
	Confiabilidad (R)	%	80
	Desviación Estándar (ZR)	-	-0.841
	Error estándar (So)	-	0.45
	Coeficiente de drenaje(m)	-	1.00

Nota. Resultados obtenidos mediante el diseño. Fuente: Los autores.

Determinación del número estructural de la vía SN

Por medio de la ecuación de diseño puede determinarse el valor de SN que soporte el W18 proyectado:

$$Log10(W18) = Zr * So + 9.36 * log10(SN + 1) - 0.20 + \frac{log10(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5})}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 * log10(MR) - 8.07$$

Donde:

W18: cantidad de aplicaciones de ejes equivalentes durante el periodo de diseño.

ZR: parámetro estadístico vinculado a la incertidumbre del índice de servicio.

So: desviación estándar total de la distribución normal de errores en variables de diseño.

(ΔPSI): diferencia entre índices de servicio inicial y final.

Mr: módulo resiliente en psi.

Una vez calculado el SN correspondiente a la sección estructural del pavimento, debe establecerse una configuración multicapa para contar con una capacidad de soporte adecuada y equivalente al número estructural establecido en el diseño. Para tal efecto, hay que aplicar una ecuación que facilita calcular los espesores de la capa de rodadura, base y subbase.

El SN que proporciona la estructura de pavimento esta dado por la siguiente ecuación:

$$SN = a_1\, h_{1+}\, a_2\ \ m_2 h_{2+}\, a_3 m_3\, h_3$$

Donde:

SN: número estructural del pavimento.

$a_1\ \ a_2\ \ a_3$: coeficientes estructurales de capa asfáltica, base y subbase.

$h_{1+}\ \ h_{2+}\ \ h_3$: espesores de capa asfáltica, base y subbase.

$m_2 m_3$: coeficientes de drenaje de base y subbase.

Espesores mínimos

La Tabla 26 presenta los datos:

Tabla 26

Espesores mínimos según ejes

Tráfico W18	Concreto asfáltico	Base granular
Menos de 50 000	1.0(o tratamiento superficial)	4.0
50 001-150 000	2.0	4.0
150 001-500 000	2.5	4.0
500 001-2 000 000	3.0	6.0
2000 001-7 000 000	3.5	6.0
7000 000 en adelante	4.0	6.0

Nota. Ejes equivalentes en pulgada. Fuente: AASHTO (1993).

El valor de W18 calculado es de 245 549.

Cálculo del número estructural requerido por la capa asfáltica

Datos:

Desviación Estándar (ZR) $= -0.841$

$Error\ estandar(So) = 0.45$

$Serviciabilidad\ PSI\ inicial = 4.2\ PSI\ final = 2.0$

$Modulo\ resiliente = 28345\ psi$

$$Log10(245549) = -0.841 * 0.45 + 9.36 * log10(SN + 1) - 0.20 + \frac{log10(\frac{2.2}{4.2 - 1.5})}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32$$

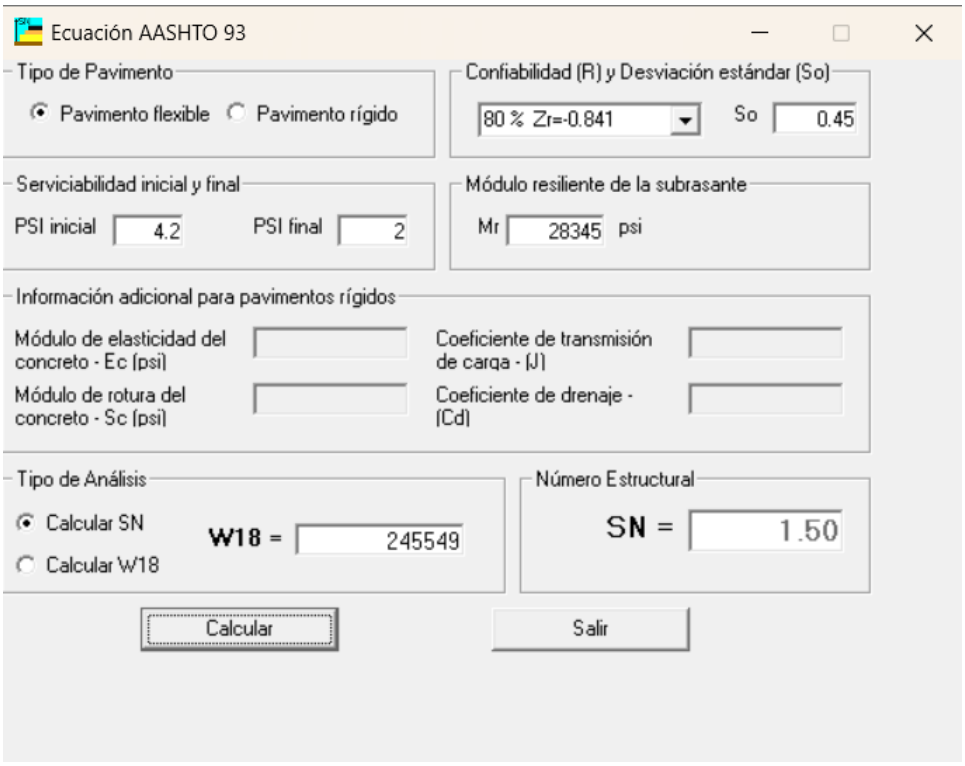
$$* log10(28345) - 8.07$$

$$SN1 = 1.50$$

A continuación, la Figura 30 presenta el cálculo del SN mediante el programa AASHTO 93

Figura 30

Calculo SN ecuación AASHTO-93



Nota. Número estructural. Fuente: Programa ecuación AASHTO 93.

Cálculo del espesor de la capa asfáltica

$$h1 = \frac{SN1}{a1}$$

$$h1 = \frac{1.50}{0.418}$$

$$h1 = 3.57\ plg\ \approx 4\ plg\ = 10.16\ cm\ \approx 10.00 cm$$

$$SN_1^* = a1 * h1$$

$$SN_1^* = 0.418 * 4$$

$$SN_1^* = 1.672$$

Cálculo del número estructural requerido por la base granular

Desviación Estándar (ZR) $= -0.841$

$Error\ estandar(So) = 0.45$

$Serviciabilidad\ PSI\ inicial = 4.2$

$PSI\ final = 2.0$

$Modulo\ resiliente\ = 13500\ psi$

$$log10(245549) = -0.841 * 0.45 + 9.36 * log10(SN + 1) - 0.20 + \frac{log10(\frac{2.2}{4.2 - 1.5})}{0.40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32$$

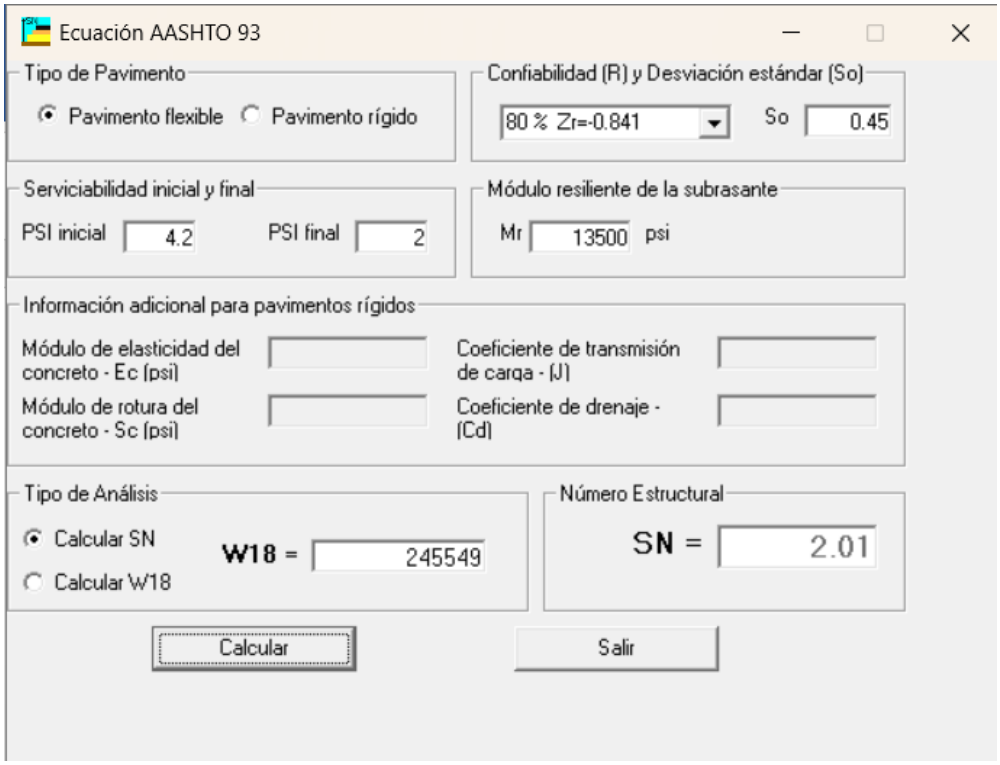
$$* log10(13500) - 8.07$$

$$\boldsymbol{SN2 = 2.01}$$

A continuación, la Figura 31, presenta el cálculo del número estructural de la base granular.

Figura 31

Calculo SN ecuación AASHTO-93



Nota. Número estructural base granular. Fuente: Programa ecuación AASHTO 93.

Cálculo del espesor de la base granular

$$h2 = \frac{SN_2 - SN_1^*}{a2 * m_2}$$

$$h2 = \frac{2.01 - 1.672}{0.134 * 1}$$

Espesor de la base granular: $h2 = 4.94plg \approx 5plg \approx 15.08\,cm = 15cm$

$$SN_2^* = a2 * h2 * m2 + SN_1^*$$

$$SN_2^* = 0.134 * 5 * 1 + 1.672 = 2.342$$

Cálculo del número estructural requerido por la subbase granular

$$Log10(245549) = -0.841 * 0.45 + 9.36 * log10(SN + 1) - 0.20 + \frac{log10(\frac{2.2}{4.2 - 1.5})}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32$$

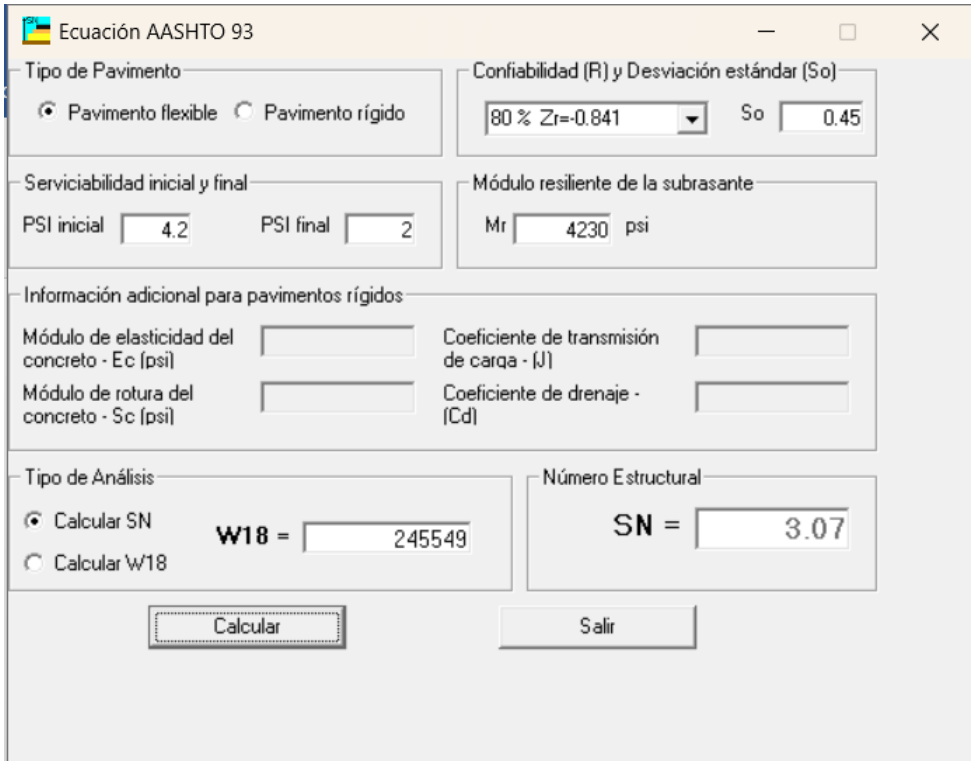
$$* log10(4230) - 8.07$$

$$\boldsymbol{SN3 = 3.07}$$

A continuación, la Figura 32 presenta el cálculo realizado en el programa ecuación AASHTO 93 de la subbase granular:

Figura 32

Programa para calcular el SN de la subbase granular



Nota. Cálculo de la subbase granular. Fuente: Programa ecuación AASHTO 93.

Cálculo del espesor de la subbase granular

$$h3 = \frac{SN_3 - SN_2^*}{a3 * m_2}$$

$$h3 = \frac{3.07 - 2.342}{0.100 * 1}$$

$$h3 = 7.24\,plg \approx 7.5plg \approx 19.05\,cm \approx 19\,cm$$

La Tabla 27 presenta la comparación de resultados:

Tabla 27

Análisis de resultados entre AASHTO 93 y WinDEPAV 2.6.

Diseños de estructuras de pavimentos		
Capas	**AASHTO 93**	**WinDEPAV 2.6**
Carpeta Asfáltica	10	15
Base	15	20
Subbase	19	25
Total (cm)	44	60

Nota. Diseños de pavimentos flexibles con el método tradicional empírico y el mecanicista. Fuente: Los autores.

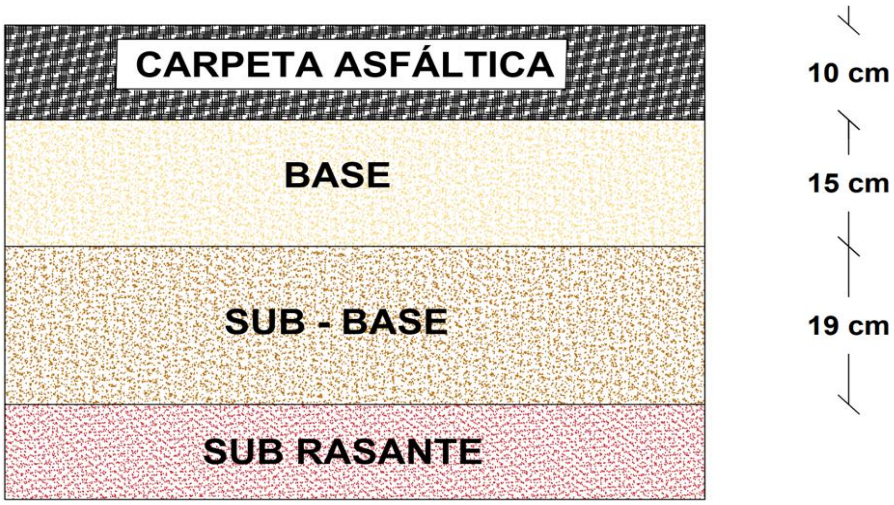
La estructura diseñada con el método AASTHO-93 cuenta con un espesor total de 44,00 cm, conformado por una carpeta asfáltica de 10,00 cm, una base granular de 15,00 cm y una subbase de 19,00 cm. Sin embargo, no fue posible realizar el análisis en WinDEPAV 2.6 debido a que se determinó que el pavimento no tendría funcionalidad y desempeño estructural, pues los factores de daño son mayores a 1.

En respuesta a esta limitación se incrementaron los espesores a 60 cm con el fin de contar con una solución que mantuviera la vialidad económica de la estructura del pavimento flexible. Tras la modificación, se evaluó nuevamente en el programa y pudo obtenerse un factor de daño menor a 1, de tal modo que la estructura cumple con los modelos de daño establecidos por fatiga y ahuellamiento.

Por otra parte, la Figura 33 presenta los espesores de la carpeta asfálticas ASSTHO-93, mientras que la Figura 34 detalla los de WinDEPAV 2.6.

Figura 33

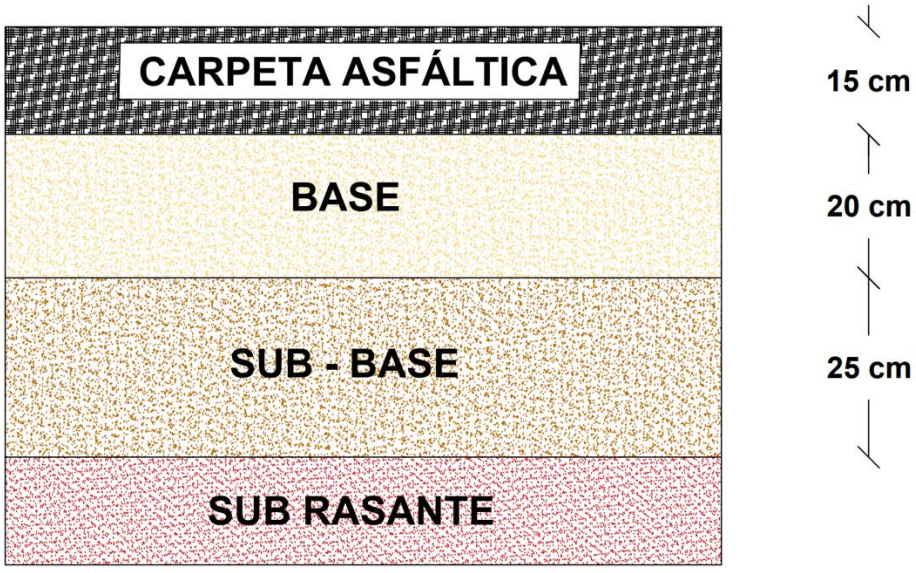
Espesores de carpeta asfáltica ASSTHO-93



Nota. Carpeta asfáltica ASSTHO-93. Fuente: Los autores.

Figura 34

Espesores de carpeta asfáltica WinDEPAV 2.6.



Nota. Carpeta asfáltica WinDEPAV. Fuente: Los autores.

CONCLUSIONES

Al contrastar los resultados del AASHTO-93 y el software mecanicista-empírico WinDEPAV 2.6 se observa que el diseño recomendado por el programa es más robusto, con un espesor total de 60 cm frente a los 44 cm del otro método, lo que garantiza un mejor desempeño frente a la fatiga y el ahuellamiento.

El diseño propuesto por WinDEPAV 2.6 cumple con los requisitos de daño por fatiga y compresión y garantiza que los factores estén por debajo del umbral crítico de 1. Ello implica que el pavimento tendrá un rendimiento adecuado ante a las cargas proyectadas y soportará condiciones extremas de tráfico y clima durante su vida útil.

El factor de daño por fatiga en las capas analizadas es significativamente bajo, de solo 0.056, lo que se traduce a un diseño con alta resistencia a fallas conexas; por lo tanto, el pavimento puede soportar un elevado número de repeticiones de carga antes de presentar grietas. En cambio, el factor de daño por compresión presenta valores más elevados, de 0.653 en su última capa; y pese a que sigue por debajo del límite crítico (1.0), las capas corren mayor riesgo de deformación permanente si no se controlan de forma adecuada y, en consecuencia, desembocan en fallas prematuras, como el ahuellamiento.

Las tensiones normales (Sigma Z y Sigma T) y las deformaciones (Épsilon Z y Épsilon T) muestran que las capas superiores del pavimento soportan la mayor parte del esfuerzo generado por una carga aplicada, lo que corrobora la eficiencia del diseño en la distribución de tensiones hacia las capas inferiores.

Los valores de la relación de Poisson (v) de las distintas capas varían entre 0.35 y 0.45, lo que es consistente con los rangos típicos de los materiales utilizados en el diseño de pavimentos. Ello refleja el comportamiento elástico de los materiales, su capacidad de deformarse frente a la acción de una carga y que las tensiones generadas se transmitan eficientemente hacia las capas inferiores.

Conclusiones del uso del programa

El uso de WinDEPAV 2.6 para el análisis y diseño de pavimentos flexibles representa un avance significativo, puesto que ofrece una solución eficiente para modelar con precisión las condiciones reales de funcionamiento y determinar con exactitud los espesores necesarios de cada capa.

Una de las utilidades principales del software es su rendimiento para minimizar los errores humanos en el diseño, pues automatiza cálculos complejos que en los métodos tradicionales deben realizarse manualmente, mejorando así la precisión. Al disminuir la probabilidad de errores en los cálculos y en la interpretación de los datos, WinDEPAV 2.6 se posiciona como la piedra angular para estructurar pavimentos más eficientes.

El programa optimiza y agiliza el proceso de diseño gracias a su interfaz y a la capacidad de realizar simulaciones en tiempo real, lo que permite a los ingenieros evaluar rápidamente distintos escenarios y adaptarse a las condiciones particulares del proyecto. Sin duda, las comparaciones al instante reducen notablemente el tiempo de diseño e influye con decisiones acertadas basados en datos precisos y confiables.

RECOMENDACIONES

Se recomienda que los profesionales de ingeniería civil e instituciones universitarias adopten WinDEPAV 2.6 como herramienta de base para el diseño de pavimentos flexibles, puesto que su capacidad para realizar un análisis detallado y preciso lo convierte en un recurso indispensable.

Es fundamental que todos los datos de entrada sean precisos antes de iniciar el análisis con WinDEPAV 2.6, ello incluye la verificación de las condiciones del TPDA, CBR (California Bearing Ratio), módulos de elasticidad, relación de Poisson, etc. La precisión en esta etapa es crucial, pues cualquier error compromete la validez de los resultados.

A pesar de la precisión de WinDEPAV 2.6, es esencial implementar un sistema de monitoreo continuo para validar los resultados y ajustar los parámetros de diseño según sea necesario. Por ende, se recomienda que los proyectos viales que utilicen este software incluyan fases de seguimiento y evaluación a lo largo de la vida útil del pavimento flexible con el fin de verificar el rendimiento real.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguirre, E. (s.f.). *Informe TPDA (trasados de carreteras).* https://es.scribd.com/document/401834062/INFORME-TPDA-Trasados-de-Carreteras

American Association of State Highway and Transportation Officials [ASSHTO]. (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structure.* ASSHTO.

Asphalt Institute. (2007). *The Asphalt Handbook.* Asphalt Institute.

Caro, S., Coral, L. y Caicedo, B. (2003). Modelación del ahuellamiento en mezclas asfálticas de pavimentos. *Revista de Ingeniería*, *1*(18), 41-47. https://doi.org/10.16924/revinge.18.6

Chanaluisa, J. y Chandi, A. (2024). *Desarrollo de una guía práctica para el uso del software "DISPAV-5 3.0", aplicada en un pavimento flexible* [tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana]. https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/27189

Construmática. (s.f.). *Ensayo CBR.* https://www.construmatica.com/construpedia/Ensayo_CBR

Coronado, J. (2002). *Manual Centroamericano para diseño de pavimentos.* USAID/SIECA

Delatte, N. (2014). *Concrete Pavement Design, Construction, and Performance.* CRC Press.

Dorado, B. y Castro, S. (2023). *Guía práctica para la aplicación del software WESLEA, para el cálculo y modelación de pavimentos flexibles* [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana]. https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/25305

Editorial Etecé. (29 de agosto de 2024). *Software.* Concepto. https://concepto.de/software/

Huang, Y. (2004). *Análisis y diseño de pavimentos*. Pearson

Lara, J. (2021). *Evaluación de métodos indirectos para la determinación de módulo dinámico de mezclas asfálticas* [tesis de maestría, Universidad del Norte]. https://manglar.uninorte.edu.co/handle/10584/10309#page=1

Lainez, D. (2022). *Análisis estructural y comparativo para diseño de pavimentos flexibles mediante los softwares IMT-PAVE Y WINDEPAV 2.6 del método mecanicista empírico, con el método AASHTO 93* [tesis de pregrado, Universidad Estatal Península de Santa Elena]. https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/8445

Lynch, H. (2022). *Diseño estructural de pavimentos flexibles y rígidos: nuevos y de refuerzo (vías urbanas, estacionamientos, carreteras y aeropuertos)*. Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat.

Martínez, J. (2015). *Consideraciones para el diseño del pavimento flexible vía de acceso puente vehicular colgante rio Tibú* [tesis de pregrado, Universidad Militar Nueva Granada]. https://repository.unimilitar.edu.co/items/e3ddd5e0-ccb8-4319-b537-5ba03918b37b

Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones. (2002). *Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes. MOP-001-F 2002.* MOP

Montejo, A. (2002). *Ingeniería de pavimentos para carreteras.* (2ª ed.). Universidad Católica de Colombia.

Universidad Mayor de San Simón [UMSS]. (2019). *Manual completo de diseño de pavimentos.* UMSS.

Valenzuela, J. (s.f.). *Generalidades y definición sobre los pavimentos.* http://www.bidi.uson.mx/TesisIndice.aspx?tesis=2944

Vásquez, L. (2018). *WinDEPAV 2.6 software para análisis y diseño de pavimentos con metodología mecanicista-empírica. UNPCI2018 software para el cálculo del PCI.* INGEVAP. https://sites.google.com/site/windepav/

Yoder, E. y Witczak, M. (1991). *Principios del diseño de pavimentos*. John Wiley & Sons.

Zhu, B., Hu, D., Liao, F., Chen, J., Su, B., Wu, J. y Wang, Y. (2023). A Fast Approach to Optimize Tread Pattern Shape for Tire Noise Reduction. *Applied Sciences, 13*(18). https://doi.org/10.3390/app131810256

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Capacidad portante (o soportante): aptitud de un suelo o roca, en desmonte; relleno o capa de firme para soportar las cargas del tránsito.

Capa de rodadura o superficie: capa superior de la calzada, de material especificado, designada para dar comodidad al tránsito.

Carpeta: capa de concreto asfáltico, de un espesor determinado, que se coloca para que sirva de capa de rodadura.

CBR: ensayo que mide la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo y para poder evaluar la calidad del terreno para subrasante, subbase y base de pavimentos. Se efectúa bajo condiciones controladas de humedad y densidad (Construmática, s.f.).

Áridos o Agregados: nombre genérico para distintos conjuntos de partículas minerales, de diferentes tamaños, que proceden de la fragmentación natural o artificial de las Rocas.

Asfalto: betún sólido, semisólido o líquido, de color entre negro o pardo oscuro, encontrado en depósitos naturales u obtenido artificialmente como un residuo del petróleo (MOP, 2002).

Daño: afectación producida en alguna de las capas del pavimento debido a factores externos como cargas o factores climáticos.

Estructura del Pavimento: combinación de capas de Sub-base, Base y de Superficie o rodadura colocadas sobre una Sub-rasante, para soportar las cargas del tránsito y distribuir los esfuerzos en la plataforma

Fatiga: daños ocasionados por la circulación del vehículo que generan grietas en la parte inferior de la carpeta asfáltica y con el tiempo Input: entrada de datos en un software.

Módulo Resiliente: medida de la capacidad de una capa de pavimento de almacenar o absorber energía sin que este experimente deformación permanente.

Módulo dinámico de la mezcla asfáltica: valor absoluto de la relación entre el valor del esfuerzo máximo y el de la deformación unitaria máxima, obtenido en un ensayo a compresión

(uniaxial o triaxial), a flexión y tracción indirecta, utilizando cargas en forma cóncava (Lara, 2021).

Pavimento: nombre genérico para toda la "estructura" de un pavimento (Firme). No obstante, se lo utiliza también para designar solo la capa de rodadura, especialmente cuando ella está constituida por una carpeta.

Rasante: línea de gradiente a nivel de la superficie de rodadura del camino.

Software: conjunto de programas y rutinas que permiten a la computadora realizar determinadas tareas. (Editorial Etecé, 2024).

Sub-base: capas, de espesor definido, de materiales que cumplen determinadas especificaciones, las cuales se colocan sobre una sub-rasante aprobada, para soportar la capa de base.

Sub-rasante: superficie superior de la obra básica, preparada como fundación de la estructura de pavimento y de los espaldones.

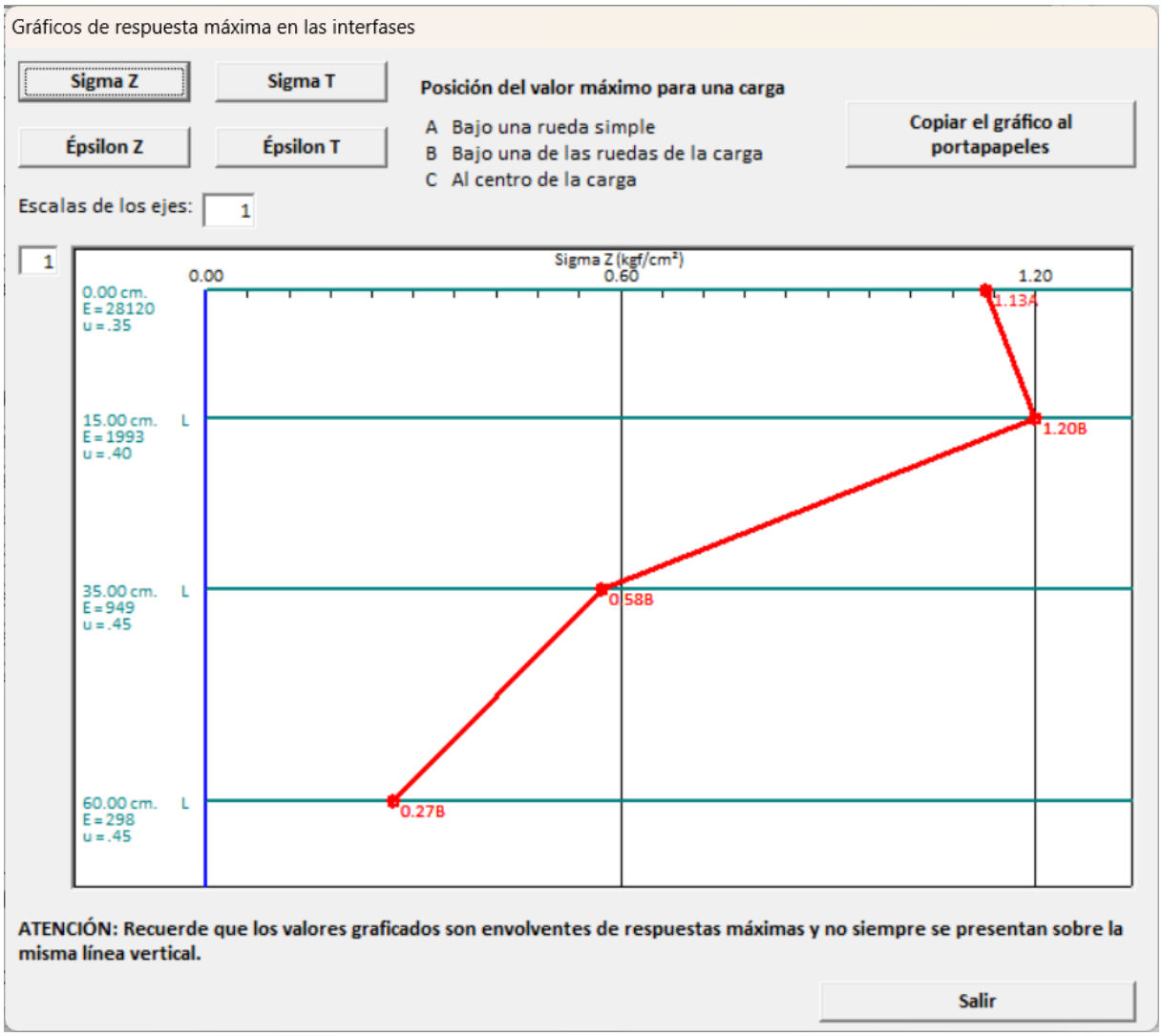
TPDA: es la unidad de medida en el tráfico de una carretera que representa el volumen del tráfico promedio diario anual. Se determina a partir de las observaciones puntuales del tráfico y de los factores de variación. (Aguirre, s.f.).

Vía: área debidamente acondicionada para el paso de peatones, cabalgaduras o vehículos.

ANEXOS

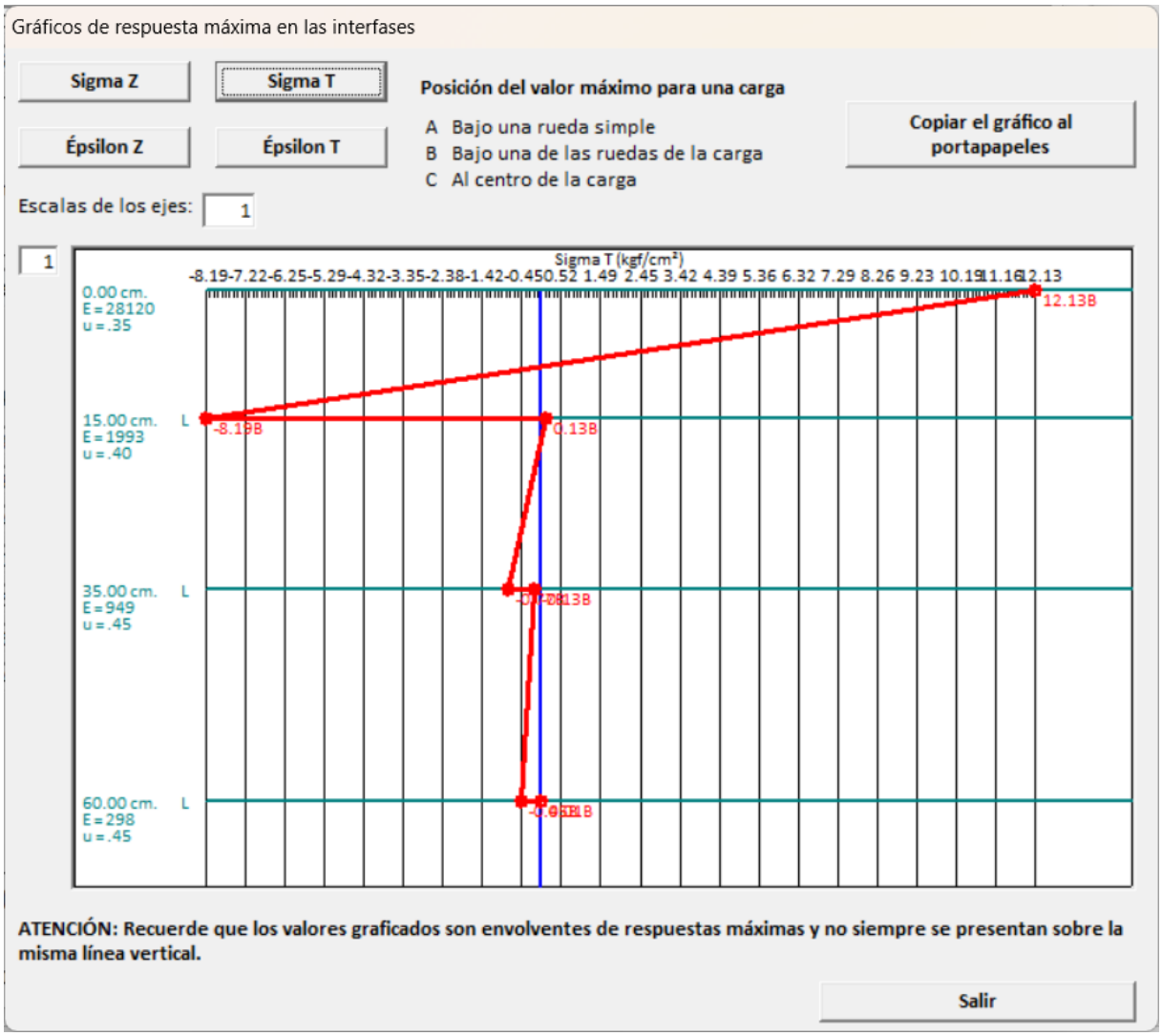
Anexo 1

Gráfico de respuesta máxima en las interfaces del Sigma Z



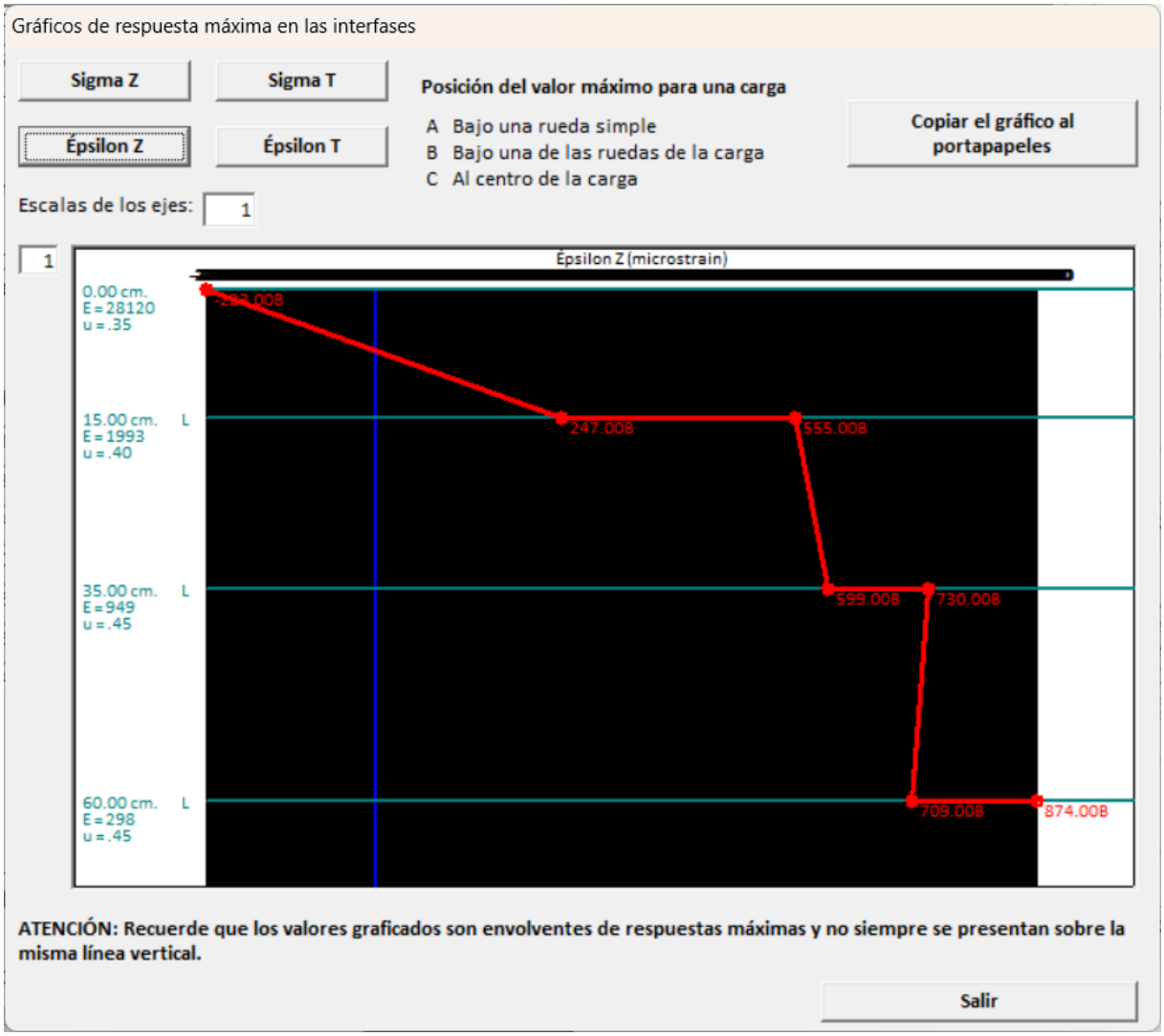
Anexo 2

Gráfico de respuesta máxima en las interfaces del Sigma T



Anexo 3

Gráfico de respuesta máxima en las interfaces del Épsilon Z



Anexo 4

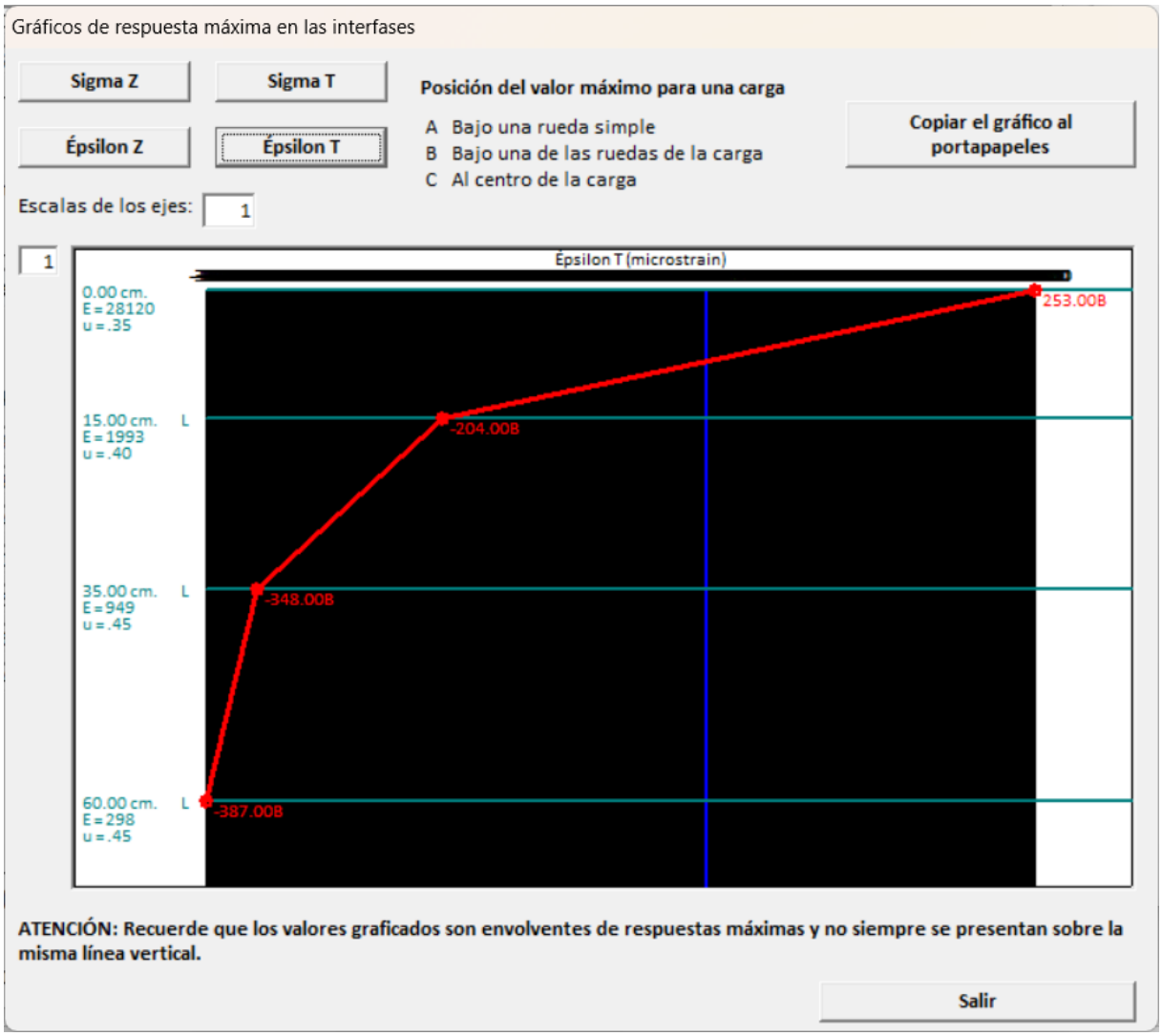



Gráfico de respuesta máxima en las interfaces del Épsilon T