



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA
T U N J A



ingenio Magno

8
No. 1



OPEN ACCESS
descarga gratuita

<http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/ingeniomagno>

ISSN (versión impresa)

2145-9282

ISSN (en línea)

2422-2399

Enero-junio de 2017, vol. 8, no. 1

Universidad Santo Tomás

Tunja, Boyacá

Publicación semestral

Hecho el depósito que establece la ley

© Derechos reservados

Universidad Santo Tomás

Suscripción y canje

Unidad de Investigación

Cll. 19 No. 11-64

Universidad Santo Tomás, Tunja-Colombia

PBX: 744 0494

Línea gratuita: 018000 932340

desde cualquier lugar del país

<http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/ingeniomagno>

Los conceptos expresados en los artículos son de exclusiva responsabilidad de sus autores y no comprometen a la Institución o a la publicación.

División de Arquitectura e Ingenierías

INGENIO MAGNO	Tunja Colombia	Vol. 8 No. 1	pp. 1-172	Enero- junio	2017
---------------	-------------------	-----------------	-----------	-----------------	------



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA
T U N J A



Directivos

P. Jorge Ferdinando RODRÍGUEZ RUIZ, O.P.
Rector

P. José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O.P.
Vicerrector Administrativo-Financiero

P. Javier Antonio CASTELLANOS, O.P.
Vicerrector Académico

P. Samuel Elías FORERO BUITRAGO, O.P.
Decano de División de Ingeniería y Arquitectura

Jimena BOHÓRQUEZ HERRERA, Ph.D.
Directora Unidad de Investigaciones

Édgar Andrés GUTIÉRREZ CÁCERES, Esp.
Director Centro de Investigaciones en Ingeniería
San Alberto Magno - (CIAM)

Editor

Fredy Andrés Aponte Novoa, M.Sc.
Centro de Investigación en Ingeniería Alberto Magno
(CIAM)
ingeniomagno@ustatunja.edu.co

Equipo Editorial

Edwin Blasnilo Rúa Ramírez, M.Sc.
Coeditor Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia
edwin.rua@usantoto.edu.co

José Ricardo Casallas Gutiérrez, M.Sc.
Coeditor Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia
jose.casallas@usantoto.edu.co

John Fredy Guzmán Vargas
Profesional en Filosofía y Letras
Corrector de estilo, redactor
fredyguzmanvargas@gmail.com

Albany Milena Lozano Násner, M.Sc.
Traducción español-portugués
mlnasner@gmail.com

Departamento de Idiomas
Traducción español-inglés
Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia
coordinacion.idiomas@ustatunja.edu.co

David Enrique González Camargo
Administrador OJS
Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia
ing.investigacion@ustatunja.edu.co

Comité Científico

Antonio Moreira Teixeira, Ph.D.
Universidad de Aberta (Lisboa, Portugal)
antonio.teixeira@uab.pt

Electo Eduardo Silva Lora, Ph.D.
Univerdidad Federal de Itajubá (Itajubá M.G., Brasil)
electo@unifei.edu.br

María Julia Mazzarino, Ph.D.
Universidad de Buenos Aires (Buenos Aires, Argentina)
mmazzari@crub.uncoma.edu.ar

Antonio Rico Sulayes, Ph.D.
Universidad de las Américas Puebla (Puebla, México)
antonio.rico@udlap.mx

Carlos Enrique Montenegro Marín, Ph.D.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Bogotá
D.C., Colombia)
cemontenegrom@udistrital.edu.co

César Darío Guerrero Santander, Ph.D.
Universidad Autónoma de Bucaramanga (Bucaramanga
- Santander, Colombia)
cguerrer@unab.edu.co

Comité Editorial de la Revista

Antonio José Bula Silvera, Ph.D.
Universidad Católica del Norte (Barranquilla - Atlántico,
Colombia)
abula@uinorte.edu.co

Wilson Javier Pérez Holguín, Ph.D.
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
(Tunja - Boyacá, Colombia)
wilson.perez@uptc.edu.co

José Carlos Escobar Palacios, Ph.D.
Investigador Universidad Federal de Itajubá (Itajubá
M.G., Brasil)
jocesobar@unifei.edu.br

Camilo Andrés Lesmes Fabian, Ph.D.
Universidad Santo Tomás (Tunja - Boyacá, Colombia)
camilo.lesmes@usantoto.edu.co

Impresión

Editorial Jotamar Ltda.
Calle 57 No. 3-39
Tel.: (8) 745 7120
editorialjotamar@yahoo.com
Tunja - Boyacá - Colombia

Programa informático para el diseño de pavimentos flexibles y rígidos por el método AASHTO

Software for the design of flexible and rigid pavements by the AASHTO method

Software para o projeto de pavimentos flexíveis e rígidos pelo método AASHTO

Para citar este artículo / To reference this article / Para citar este artigo: Rincón Ochoa, G. É. e Higuera Sandoval, C. H. (2017) Programa informático para el diseño de pavimentos flexibles y rígidos por el método AASHTO. *Ingenio Magno*, 8(1), 148-161.

Giovanni Édgar Rincón-Ochoa

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia,
Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación y
Desarrollo en Infraestructura Vial (GRINFRAVIAL)
giovanni.rincon@uptc.edu.co

Carlos Hernando Higuera-Sandoval

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia,
Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación y
Desarrollo en Infraestructura Vial (GRINFRAVIAL)
carlos.higuera@uptc.edu.co

Resumen

En el desarrollo de las labores relacionadas con el estudio y la investigación en el campo de la ingeniería de pavimentos se demanda la utilización de herramientas computacionales especializadas, que se constituyen en una parte básica del proceso, tendientes a optimizar los procedimientos y recursos. Este artículo hace una descripción del desarrollo del programa informático DESPAV (Diseño de Espesores de Pavimentos), como una herramienta pedagógica y de formación para el dimensionamiento de los espesores de las capas de pavimentos flexibles y rígidos, basada en la guía de diseño de estructuras de pavimentos publicada en 1993 por la Asociación Americana de Oficiales Estatales de Carreteras y Transportes (AASHTO). Se utiliza como plataforma de desarrollo el lenguaje de programación Java, orientado a objetos en el entorno integrado de desarrollo NetBeans IDE. La aplicación modela los cuadros, las cartas de diseño y los algoritmos matemáticos, a partir de lo cual es posible determinar soluciones estructurales basadas en los parámetros requeridos por la metodología. Este proceso es complementado por el análisis de incidencia de estas variables de diseño (análisis de sensibilidad). Los resultados obtenidos del funcionamiento de la aplicación desarrollada fueron analizados, comparados y validados satisfactoriamente con la teoría de la guía de diseño y los programas AASHTOWare DARWin 3.1 y WinPAS 1.0.

Palabras clave: Asociación Americana de Oficiales Estatales de Carreteras y Transportes (AASHTO), diseño de espesores de pavimentos, espesor de la losa de concreto, guía de diseño AASHTO, número estructural, programa DESPAV, variables de diseño.

Abstract

The use of specialized computer tools is required in the development of work related to study and research in the field of pavement engineering. They constitute a basic part of the process, tending to optimize procedures and resources. This article describes the development of DESPAV (Pavement Thickness Design) software, as a pedagogical and training tool in order to size the thickness of flexible and rigid pavement layers, based on the guide, Design of structures of pavements, published in 1993 by the American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). The Java programming language, object-oriented in the integrated NetBeans IDE development environment, is used as the development platform. The application models tables, design charts and mathematical algorithms, from which it is possible to determine structural solutions based on the parameters required by the methodology. This process is complemented by the incidence analysis of these design variables (sensitivity analysis). The results obtained from the operation of the developed application were analyzed, compared and validated satisfactorily with the theory of the design guide and the programs AASHTOWare DARWin 3.1 and WinPAS 1.0.

Keywords: American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), pavement thickness design, concrete slab thickness, AASHTO design guide, structural number, DESPAV program, design variables.

Resumo

No desenvolvimento do trabalho relacionado ao estudo e pesquisa no campo da engenharia do pavimento, o uso de ferramentas informáticas especializadas é requerido, já que constituem uma parte básica do processo, tendendo a otimizar procedimentos e recursos. O presente artigo descreve o desenvolvimento do software DESPAV (Pavement Thickness Design, sigla em inglês), como ferramenta pedagógica e de treinamento para dimensionar a espessura das camadas de pavimento flexível e rígido, com base na guia de estrutura de pavimentos, publicada em 1993 pela Associação Americana de Oficiais estaduais de estradas e transportes (AASHTO, sigla em inglês). A linguagem de programação Java, orientada a objetos no ambiente de desenvolvimento integrado do NetBeans IDE, foi utilizada como plataforma de desenvolvimento. A aplicação modela os quadros, as cartas de projeto e os algoritmos matemáticos, a partir dos quais é possível determinar soluções estruturadas basadas nos parâmetros requeridos pela metodologia. Este processo é complementado por análise de incidência de estas variáveis de projeto (análise de sensibilidade). Os resultados obtidos do funcionamento da aplicação desenvolvido foram analisados, comparados e validados satisfatoriamente com a teoria da guia de projeto e dos programas AASHTOWare DARWin 3.1 y WinPAS 1.0.

Palavras chave: Associação Americana de Oficiais Estaduais de Estradas e Transportes (AASHTO), projeto de espessura do pavimento, espessura da laje de concreto, guia de projeto de AASHTO, número estrutural, programa DESPAV, variáveis de projeto.

I. Introducción

La *Guía de diseño de estructuras de pavimentos AASHTO*, publicada en 1993 por la Asociación Americana de Oficiales Estatales de Carreteras y Transportes (AASHTO, por sus siglas en inglés), producto de más de tres décadas de revisión, investigación y calibración (Vásquez, 2012), incluye los procedimientos básicos utilizados actualmente en los ámbitos nacional y regional para el dimensionamiento de pavimentos flexibles y rígidos (De La Torre, 1998). Esta metodología de tipo empírico, obtenida con base en los resultados del ensayo vial AASHO (Illinois, 1958-1960), involucra la iteración de algoritmos matemáticos y la selección manual de parámetros mediante la utilización de tablas y cartas de diseño que consideran el efecto que, sobre el comporta-

miento, tienen la solución estructural (espesores y especificaciones de las capas), las sollicitaciones actuantes (magnitud, configuración y frecuencia) y los efectos relacionados con las condiciones ambientales y de drenaje, lo cual resulta en que su aplicación sea de inherente lentitud y de precisión relativa, llegando a convertirse en una práctica poco apropiada para analizar eficientemente distintas incidencias de las variables y alternativas de diseño.

Actualmente, las aplicaciones de computador resultan ser una solución para la automatización de ciertas tareas y suelen ofrecer una gran eficiencia, ya que están exclusivamente diseñadas para resolver un problema específico. Estos programas aplicados a la ingeniería de pavimentos se convierten en herramientas potentes que ayudan a que el proceso de

diseño se realice de una forma más cómoda y rápida; como resultado se obtiene confiabilidad satisfactoria y se brinda soporte a los ingenieros para producir diseños de alta calidad, con un buen nivel de confianza y sin las desviaciones que puede producir, si se compara con la iteración y aproximación manual. Aunque en el mercado actual existe la oferta de varios paquetes computacionales, de escritorio o de servidores en línea, estos presentan algunas restricciones de uso, y sus costos de adquisición o licenciamiento son elevados. Ello incide en que diferentes escuelas de ingeniería de vías y de ingeniería civil no cuenten con estas herramientas como complemento para los procesos de formación profesional en el área disciplinar de la ingeniería de pavimentos.

Debido a las razones expuestas anteriormente, el Grupo de Investigación y Desarrollo en Infraestructura Vial (GRINFRAVIAL), de la Escuela de Transporte y Vías de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, en la línea de investigación Diseño de Infraestructura Vial, por medio de los autores del presente artículo adelantó el proyecto para el desarrollo del programa de computador DESPAV (Diseño de Espesores de Pavimentos), para ser utilizado como una herramienta pedagógica y de formación en el área del diseño de estructuras de pavimentos flexibles y rígidos, de acuerdo con el procedimiento empírico presentado en la cuarta edición de la guía AASHTO.

El programa DESPAV (Rincón, 2017) es una herramienta computarizada diseñada bajo el ambiente Windows, de uso cómodo y flexibilidad, desarrollada para simplificar notablemente los procedimientos de diseño y las iteraciones manuales vinculados al dimensionamiento de estructuras de pavimentos flexibles y rígidos, de acuerdo con la metodología

de la guía AASHTO de 1993. De este modo, se obtendrán soluciones estructurales de confiabilidad satisfactoria, al igual que el análisis de incidencia de las variables de diseño proporcionadas mediante gráficos de sensibilidad. Con el programa DESPAV se reduce el tiempo para encontrar alternativas estructurales satisfactorias, con miras a direccionar al diseñador hacia el análisis y la interpretación de los resultados; para ello, habrá de enfocarse en su comprensión y podrá realizar estudios paramétricos o comparativos para el entendimiento de los factores que controlan una determinada variable de diseño.

De igual forma, el programa le permitirá al diseñador evaluar diferentes alternativas de diseño, como soporte para seleccionar la estructura con las condiciones óptimas para el adecuado comportamiento estructural y funcional, acorde con las solicitaciones de las cargas de tránsito y las condiciones ambientales y de drenaje previstas para el periodo de análisis o de diseño considerado. Asimismo, podrá valorar diferentes opciones que aseguren la sensibilidad final del diseño, a través de la evaluación de aspectos desde un punto de vista técnico y económico, donde se balancee apropiadamente el costo inicial de construcción, los costos de mantenimiento, el valor residual y la estructura de pavimento más económica (AASHTO, 1993). Lo anterior, teniendo en cuenta que para la adecuada aplicación del programa es primordial un conocimiento básico de los fundamentos y principios de ingeniería asociados al diseño de estructuras de pavimento.

Para pavimentos flexibles, el propósito fundamental de la aplicación es determinar el número estructural (SN) requerido o de diseño. Además, se integra el dimensionamiento de los espesores de las capas de rodadura, base

y subbase (no tratadas y tratadas) de diferentes alternativas o modelos estructurales de pavimento mediante el método de análisis por verificación de capas y el análisis de capas específico. Asimismo, incluye opciones para la selección de los parámetros de diseño recomendados para la implementación de la metodología. Para el caso de estudios paramétricos o de comparación de alternativas, el análisis del efecto de la incidencia de los principales parámetros de diseño sobre el número estructural se realiza mediante la representación gráfica de tendencias de sensibilidad.

Para pavimentos rígidos, la aplicación tiene como objetivo principal determinar el espesor (D) de losas de concreto simple. Incluye los criterios para la modulación de las losas de concreto de acuerdo con las recomendaciones de la guía AASHTO. Se complementa con la selección de los mecanismos de transferencia mecánica de carga en juntas longitudinales y transversales según las recomendaciones del *Manual de diseño de pavimentos de concreto en vías con medios y altos volúmenes de tránsito* (Instituto Nacional de Vías [Invías], 2008). De igual forma, para pavimentos flexibles, contiene opciones para la selección de las magnitudes recomendadas de los parámetros de diseño, así como la representación de su variación a través de gráficas de sensibilidad.

Aunque es evidente que en un futuro el empleo de los métodos de diseño empírico-mecánico con programas de computador de última generación se introduzca en nuestro medio, estos requerirán de una importante compilación de bases de datos y de actividades de calibración, que posiblemente demandará varios años o décadas para poder ser implementada (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2014). En ese orden, el procedimiento de diseño de estructuras de pavimentos pre-

sentado en la guía AASHTO de 1993 aún se constituye como un método de amplia aceptación, compatible con la información disponible para el diseño de pavimentos en los ámbitos nacional y regional.

II. Materiales y métodos

A. Consideraciones básicas de diseño

El procedimiento de diseño de estructuras de pavimentos (flexibles y rígidos) contenido en la guía AASHTO de 1993 se fundamenta en los resultados y algoritmos básicos desarrollados de los estudios de carreteras realizados en el ensayo vial AASHO, al igual que en más de treinta años de revisión, investigación y calibración (Vásquez, 2012; Jiménez, 1997).

Para el diseño de estructuras de pavimentos flexibles y rígidos, la guía AASHTO proporciona soluciones algorítmicas y relaciones empíricas entre el espesor, la magnitud y configuración de las cargas de tránsito, el número de aplicaciones de cargas, las propiedades de los materiales, las características estructurales y los criterios de comportamiento para una estructura en las condiciones del ensayo vial AASHO (Van Til *et al.*, 1972).

B. Diseño de pavimentos flexibles

La herramienta que el método de diseño utiliza en el diseño de pavimentos flexibles es el número estructural, cuya magnitud se utiliza para determinar los espesores adecuados de las capas que soportarán las solicitaciones del tránsito durante el periodo de diseño, bajo ciertas condiciones ambientales, y un índice de serviciabilidad definido al final de la vida de servicio (AASHTO, 1993). Para determinar el número estructural requerido, el método suministra la siguiente ecuación básica:

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R \times S_o + 9.36 \times \log_{10}(SN + 25.4) - 16.4 + \frac{\log_{10} \frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}}{0.40 + \frac{97.811}{(SN + 25.4)^{5.19}}} + 2.32 \times \log_{10}(M_R) \quad [1]$$

Donde W_{18} es el número previsto de aplicaciones de carga por eje simple, equivalente de 80 kN (18,000 libras), Z_R es la desviación estándar normal, S_o es la desviación estándar total, ΔPSI es la pérdida de serviciabilidad, M_R es el módulo resiliente de la subrasante en MPa y SN es el número estructural.

La ecuación [1] se puede solucionar a través de iteraciones sucesivas, por medio de la carta de diseño presentada en la figura 1 o con el uso de aplicaciones de computador como el programa DESPAV.

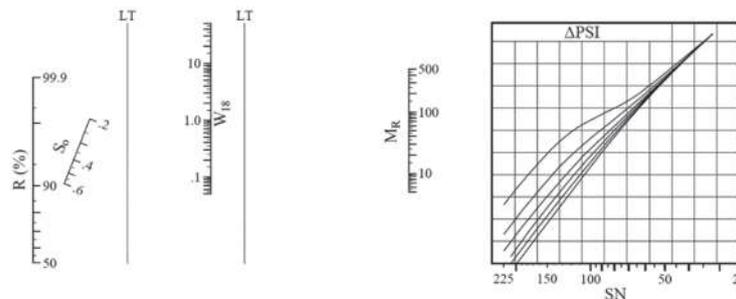


Figura 1. Carta de diseño de pavimentos flexibles

Fuente: AASHTO (1993).

El número estructural es indicativo del espesor total de pavimento requerido, el cual debe convertirse a espesores adecuados mediante coeficientes estructurales y coeficientes de drenaje, que representan los aportes de las distintas capas de los materiales empleados, definido como:

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3 + \dots + a_n D_n m_n \quad [2]$$

Donde SN es el número estructural, $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ son los coeficientes estructurales de las capas, $D_1, D_2, D_3, \dots, D_n$ son los espesores de las capas en mm y m_2, m_3, \dots, m_n son los coeficientes de drenaje de las capas no tratadas.

La ecuación [2] no tiene una solución única y depende de las alternativas de diseño, de los

materiales, de los espesores y las calidades de las capas consideradas (Higuera, 2010). En consecuencia, existirán muchas posibles combinaciones de espesores que satisfagan un determinado valor del número estructural; sin embargo, se recomiendan ciertas condiciones que limitan estas posibles soluciones y evitan el evento de presentar diseños poco prácticos y construibles, como son los análisis multicapa con verificación por capas y de estabilidad y posibilidad de construcción (espesores mínimos), los cuales están incluidos en el programa DESPAV. El proceso general para el diseño de estructuras de pavimentos flexibles utilizado para el desarrollo del programa DESPAV se presenta en la figura 2.

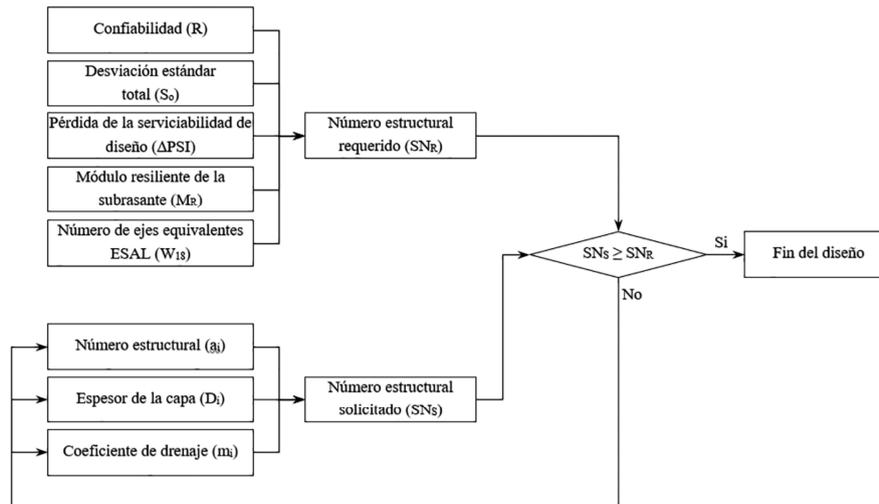


Figura 2. Proceso para el diseño de estructuras de pavimentos flexibles con el programa DESPAV

Fuente: elaboración propia a partir de De Solminihac y Echeverría (1987).

El programa DESPAV incluye opciones sistematizadas para la selección de los diferentes parámetros de diseño. Contiene un formulario para el cálculo del módulo resiliente de la subrasante en condiciones monomodal y estacionales, así como un formulario para determinar el tránsito de diseño en condiciones simplificadas. El análisis del efecto de la incidencia de las principales variables de diseño sobre el número estructural se realiza mediante la representación gráfica de tendencias de sensibilidad (figura 8).

C. Diseño de pavimentos rígidos

Para el diseño de estructuras de pavimentos rígidos, la guía AASHTO proporciona soluciones algorítmicas y relaciones empíricas para la evaluación de un modelo estructural definido, mediante el contraste del número total de ejes simples equivalentes que soporta con la sollicitación de tránsito que se espera para la estructura de pavimento (De Solminihac y Echeverría, 1987). El método proporciona la siguiente ecuación básica para el diseño estructural de pavimentos rígidos:

$$\begin{aligned}
 \log_{10}(W_{18}) = & Z_R \times S_o + 7.35 \times \log_{10}(D + 25.4) - 10.39 + \frac{\log_{10} \frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5}}{1 + \frac{1.25 \times 10^{19}}{(D + 25.4)^{8.46}}} \\
 & + (4.22 - 0.32 P_t) \times \log_{10} \frac{S'_c \times C_d (0.09D^{0.75} - 1.132)}{1.51 \times J \times 0.09D^{0.75} - \frac{7.38}{(E_c/K)^{0.25}}}
 \end{aligned} \quad [3]$$

Donde W_{18} es el número previsto de aplicaciones de carga por eje simple equivalente de 80 kN (18,000 libras), Z_R es la desviación estándar

normal, S_o es la desviación estándar total, ΔPSI es la pérdida de serviciabilidad, P_t es el índice de serviciabilidad final, S'_c es la

resistencia media a la flexo-tracción del concreto a los 28 días en MPa, E_c es el módulo de elasticidad del concreto en MPa, K es el módulo de reacción efectivo de la subrasante en MPa/m, C_d es el coeficiente de drenaje, J es el coeficiente de transferencia de carga y D es el espesor de la losa de concreto en mm.

La ecuación [3] se puede resolver a través de aproximaciones sucesivas, por medio de la carta de diseño presentada en la figura 3 o con la utilización de aplicaciones informáticas como el programa DESPAV.

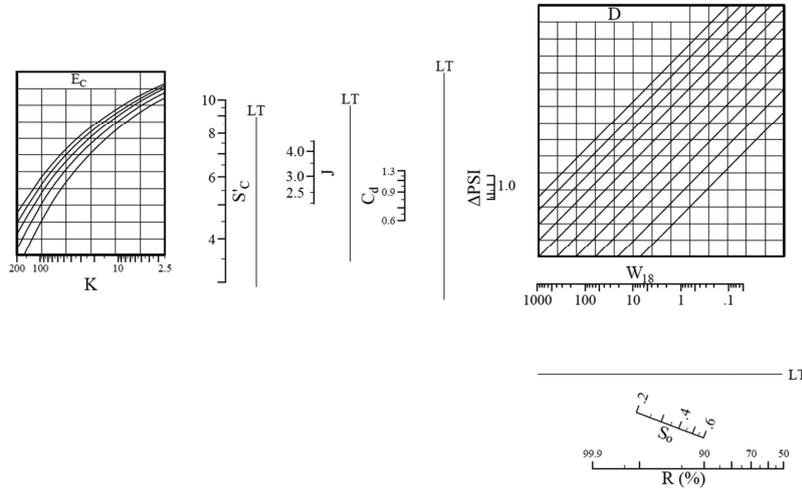


Figura 3. Carta de diseño de pavimentos rígidos

Fuente: AASHTO (1993).

El proceso general para el diseño de estructuras de pavimentos rígidos utilizado para el

desarrollo del programa DESPAV se presenta en la figura 4.

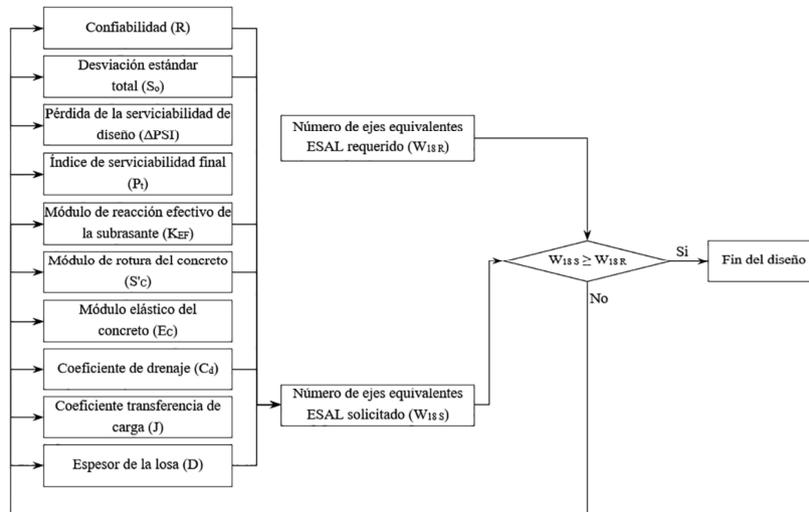


Figura 4. Proceso para el diseño de estructuras de pavimentos rígidos con el programa DESPAV

Fuente: elaboración propia a partir de De Solminihac y Echeverría (1987).

El programa DESPAV contiene un formulario para el cálculo del módulo de reacción efectivo de la subrasante en condiciones monomodal y estacionales, así como un formulario para determinar el tránsito de diseño en condiciones simplificadas. Incluye los criterios para la modulación de las losas de concreto y la selección de los mecanismos de transferencia mecánica de carga en juntas longitudinales y transversales. Se complementa con las opciones para la selección de las magnitudes recomendadas de los parámetros de diseño, así como la representación de su variación a través de gráficas de sensibilidad (figura 10).

III. Desarrollo del trabajo

El desarrollo de aplicaciones informáticas está compuesto por una serie de pasos denominados *ciclo de vida de los sistemas*. El propósito de esta técnica es definir las distintas fases que se requieren para validar y evaluar el desarrollo de una aplicación (Kendall y Kendall, 2011). En la figura 5 se presentan las fases involucradas dentro del ciclo de vida del desarrollo del programa DESPAV.

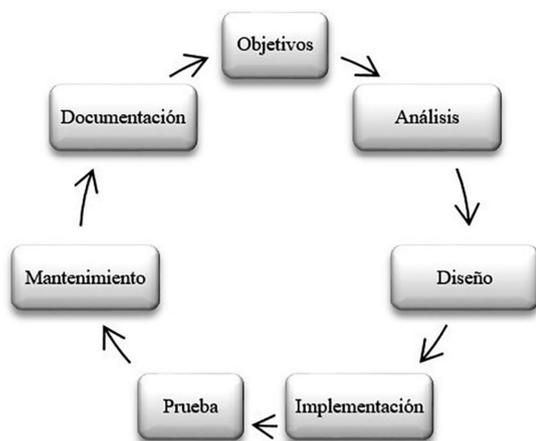


Figura 5. Ciclo de vida del desarrollo del programa DESPAV

Fuente: elaboración propia a partir de Kendall y Kendall (2011).

En la fase correspondiente a los objetivos se realizó la identificación de los problemas y oportunidades, delimitando el alcance y el resultado previsto del desarrollo de la aplicación. El análisis correspondió al proceso en el que se recopilaban los requisitos para la aplicación y los usuarios, así como la función, el rendimiento, las interfaces requeridas y las restricciones que se puedan aplicar. El diseño constituyó un proceso multipaso que se enfocó sobre cuatro atributos distintos del programa: la estructura de los datos, la arquitectura del programa, el detalle procedimental y el diseño de la interfaz.

En el proceso de implementación, el diseño se tradujo en forma legible para el lenguaje de programación. Una vez implementado, el sistema se puso a prueba de tal forma que las sentencias fuesen aprobadas y que las funciones externas se realizaran de la forma esperada. De acuerdo con Kendall y Kendall (2011), en esta etapa puede utilizarse la comparación de resultados con aplicaciones similares. Este proceso se realiza para determinar las ventajas y desventajas de la aplicación que se está diseñando, con el fin de evaluar la viabilidad y determinar si los alcances y las limitaciones del diseño están bien planeados. Para la validación de los resultados del programa DESPAV, se utilizaron las valoraciones realizadas en las aplicaciones AASHTOWARE DARWin 3.1 de la Applied Research Associates y WinPAS 1.0 de la American Concrete Pavement Association.

Una vez finalizado el desarrollo de la aplicación, se realizó su mantenimiento, donde se identificaron y corrigieron los errores y las desviaciones encontradas. Finalmente, se documentó la información necesaria para los usuarios sobre la utilización y los alcances de la aplicación.

IV. Resultados

El diseño y el desarrollo de la aplicación DESPAV se realizaron de acuerdo con el procedimiento orientado a objetos del lenguaje de programación Java, en el entorno integrado de desarrollo NetBeans IDE. En la aplicación se codificaron los cuadros, las cartas de diseño y los algoritmos matemáticos incluidos en el volumen 1 y 2 de la guía AASHTO de 1993 y 1986, respectivamente. La interfaz presenta dos módulos independientes para determinar los espesores de estructuras de pavimentos flexibles y rígidos, lo cual permitió la entrada de datos en unidades del sistema internacional

de medida y en unidades del sistema inglés, al igual que la generación de reportes en los que las entradas y salidas están recopiladas en una página prediseñada.

A. Módulo para el diseño de pavimentos flexibles

El módulo para el diseño estructural de pavimentos flexibles se utiliza para crear y analizar diseños nuevos. Incluye el formulario para el diseño estructural (determinación del número estructural requerido) presentado en la figura 6, donde se vinculan opciones de soporte para la selección o el cálculo de los parámetros necesarios.

Parámetro	Valor	Unidad	Acción
Confiabilidad (R)	90.00	%	¿R?
Desviación Estándar Normal (ZR)	-1.282		
Desviación Estándar Total (So)	0.44		¿So?
Índice de Serviciabilidad Inicial (Po)	4.20		¿Po?
Índice de Serviciabilidad Final (Pt)	2.20		¿Pt?
Módulo Resiliente de la Subrasante (MR)	50.0	MPa	Calcular MR
Número de Ejes Equivalentes ESALs (W18)	30,000,000		Calcular ESAL
Número Estructural (SN)	140.8	mm	Diseño Capas

Buttons at the bottom: Aceptar, Calcular, Sensibilidad, Imprimir, Salir.

Figura 6. Formulario para el diseño de estructuras de pavimentos flexibles con el programa DESPAV

El cálculo del número estructural se realiza de acuerdo con la modificación incluida con motivo de la implementación del programa AASHTOWare DARWin 3.0, el cual dejó de ser una magnitud adimensional para convertirse en un parámetro con unidades de longitud, que representa un espesor “abstracto” del pavimento (Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón, 2006). En unidades del Sistema Internacional de Medidas, está expresado en milímetros, mientras que en el Sistema de Unidades Inglesas se expresa en pulgadas.

Integra un formulario con la opción para el diseño de espesores con verificación de capas o diseños específicos, el cual se presenta en la figura 7. Se complementa con la opción para la selección de las propiedades de los materiales y las características estructurales de diferentes tipos de capas, de acuerdo con los criterios recomendados en la guía AASHTO y de otros investigadores.

No. Capa	Tipo de Material	Coeficiente Estructural a_i (1/plg)	Coeficiente de Diseño m_i	Espesor de la Capa D_i (plg)	Número Estructural Especificado SNI (plg)
1	Concreto Asfáltico	0.440	1.00	120.0	52.8
2	Base Granular	0.140	1.00	250.0	35.0
3	Subbase Granular	0.120	1.00	450.0	54.0

Figura 7. Formulario para el diseño de espesores por verificación de capas y para diseños específicos

Como se mencionó, el programa DESPAV contiene un formulario para determinar el módulo resiliente de la subrasante en condiciones monomodal y estacionales, así como un formulario para determinar el tránsito de diseño en condiciones simplificadas, con tres alternativas para la entrada de información. Contempla la entrada de información a partir de conteos para vehículos incluidos dentro de las designaciones del Invías o particularizados, así como

con información correspondiente a la configuración y las cargas asociadas a un tipo de eje particular.

El módulo para el diseño de pavimentos flexibles incluye la generación de gráficos de sensibilidad como el presentado en la figura 8. Se presentan como líneas de tendencia que representan la incidencia de las principales variables sobre el número estructural requerido.

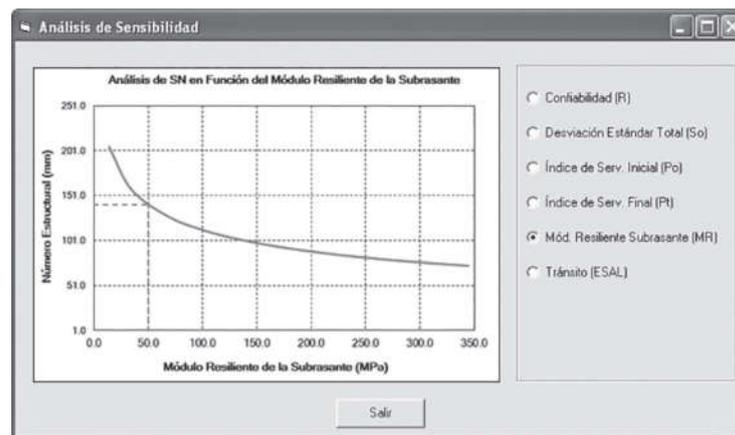


Figura 8. Gráfica de análisis de sensibilidad para pavimentos flexibles con el programa DESPAV

B. Módulo para el diseño de pavimentos rígidos

El módulo para el diseño estructural de pavimentos rígidos presentado en la figura 9 se utiliza para crear y analizar diseños nuevos de

losas de concreto simple. Al igual que para pavimentos flexibles, contiene opciones de soporte para la selección de las magnitudes recomendadas de los parámetros de diseño, así como un formulario para determinar el tránsito de diseño en condiciones simplificadas.

Figura 9. Formulario para el diseño de estructuras de pavimentos rígidos con el programa DESPAV

De forma similar que el módulo para pavimentos flexibles, se presentan gráficas de sensibilidad como la mostrada en la figura 10, que

representan la incidencia de las principales variables sobre el espesor de la losa de concreto.

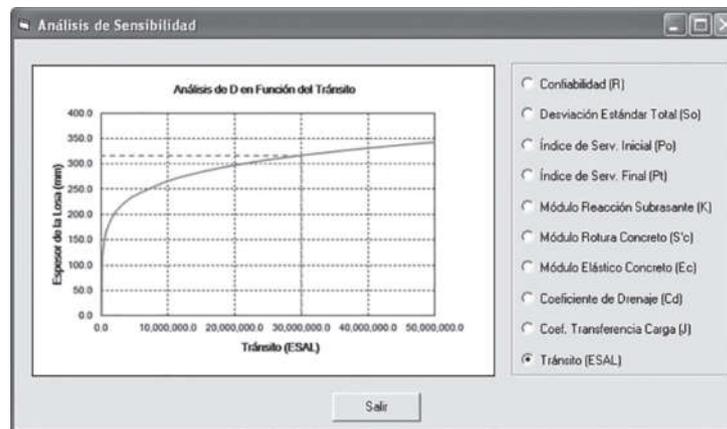


Figura 10. Gráfica de análisis de sensibilidad para pavimentos rígidos con el programa DESPAV

El programa incluye un formulario para la determinación del módulo de reacción efectivo de la subrasante, donde se calcula la capacidad portante que aportarán las diferentes capas de apoyo y la pérdida de soporte que puede ocurrir por la erosión de la base o subbase. Además, se vinculan recomendaciones para modulación de losas, lo que se refiere a

definición de sus dimensiones. Asimismo, se proporcionan las recomendaciones geométricas y las propiedades de los materiales para la selección de los sistemas mecánicos de transferencia de carga, de acuerdo con las recomendaciones del *Manual de diseño de pavimentos de concreto en vías con medios y altos volúmenes de tránsito* (Inviás, 2008).

V. Discusión

Con el fin de asegurar los resultados del programa DESPAV, estos se procedieron a comparar con aplicaciones reconocidas en el ámbito internacional para el dimensionamiento de espesores de pavimentos flexibles y rígidos basadas en la metodología de la guía AASHTO. De acuerdo con lo anterior, para el ciclo de implementación se utilizaron los resultados obtenidos con los programas especializados AASHTOWARE DARWin 3.1 de la Applied Research Associates y WinPAS 1.0 de la American Concrete Pavement Association.

La comparación de resultados y su respectiva validación se realizó a partir de la modelación de los parámetros de diseño y los catálogos de estructuras contenidas en el *Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito* (Invías, 1998) y el *Manual de carreteras del Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú* (2014). En total, se realizaron 1.020 modelaciones estructurales en las aplicaciones (DESPAV, AASHTOWARE DARWin 3.1 y WinPAS 1.0), sobre 110 combinaciones de sistemas de pavimento flexible y 60 combinaciones de sistemas de pavimentos rígidos, en los sistemas de unidades de medida internacional e inglés.

El análisis estadístico de las medidas de dispersión de los resultados obtenidos con los tres programas, para cada una de las combinaciones estructurales modeladas, dio como resultado que para pavimentos flexibles se logró un coeficiente de variación máximo del 0,39% y para pavimentos rígidos, del 0,38%. Esto significa que los resultados obtenidos con los tres programas presentan una variabilidad mínima. Se evidenció que la única diferencia entre los resultados es ocasionada por la posición o el número de fracciones decimales utilizadas para la presentación de los resultados en cada aplicación.

En cuanto a las gráficas de sensibilidad generadas, estas corresponden con las tendencias tipo obtenidas con otras aplicaciones especializadas, como es el programa AASHTOWARE DARWin 3.1. Estas gráficas presentan el efecto de las diferentes variables de diseño sobre el espesor, a partir de lo cual se logra reducir el tiempo para encontrar múltiples alternativas estructurales satisfactorias de los algoritmos básicos del método, asegurando la sensibilidad final del diseño.

VI. Conclusiones

Como resultado del diseño y desarrollo de programa DESPAV se obtiene una herramienta útil en el campo de la ingeniería de pavimentos, para el dimensionamiento de estructuras de pavimentos flexibles y rígidos basados en la guía AASHTO de 1993. Este programa constituye un aporte para adelantar o dar continuidad a proyectos de investigación relacionados con el desarrollo de aplicaciones informáticas especializadas enfocadas hacia el diseño de pavimentos.

De acuerdo con el proceso de implementación del programa DESPAV y su comparación con otras aplicaciones, se validó que las sentencias y las funciones externas de la aplicación se realizaran de la forma esperada para la determinación del número estructural para pavimentos flexibles y el espesor de losas de concreto simple para pavimentos rígidos, logrando el cumplimiento de los alcances y las limitaciones planeados en el ciclo de vida de la aplicación.

Con la implementación del programa DESPAV se logra una simplificación notable del proceso de diseño, por cuanto brinda mayores facilidades para el dimensionamiento de estructuras de pavimentos flexibles y rígidos basados en la metodología AASHTO de 1993. Se obvian así los procedimientos, las iteraciones manuales

y las posibles desviaciones de la utilización de los cuadros, las cartas de diseño y los algoritmos matemáticos vinculados, y se direccionan los esfuerzos de los investigadores hacia el análisis, la comparación y la interpretación de los resultados. Igualmente, se incorporan el análisis de incidencia de las variables de diseño mediante la interpretación de los gráficos de sensibilidad, enfocándose en la optimización del tiempo y recursos, y no en los procedimientos de cómputo.

VII. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Asociación Americana de Oficiales Estatales de Carreteras y Transportes (AASHTO) la autorización para incorporar material de los volúmenes 1 y 2 de la guía de diseño de estructuras de pavimentos AASHTO en la presente investigación. A los integrantes del Grupo de Investigación y Desarrollo en Infraestructura Vial (GRINFRAVIAL), Categoría C, de la Escuela de Transporte y Vías de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, por sus orientaciones y asesorías para la elaboración del presente artículo.

Referencias

Asociación Americana de Oficiales Estatales de Carreteras y Transportes (AASHTO) (1986). *AASHTO Guide for design of pavement structures Volume 2*. Washington: Autor.

Asociación Americana de Oficiales Estatales de Carreteras y Transportes (AASHTO) (1993). *AASHTO Guide for design of pavement structures*. Washington: Autor.

De La Torre, A. (1998). *Curso de actualización de diseño estructural de caminos método AASHTO 93* (3.ª ed). San Juan: Escuela de Ingeniería de Caminos de Montaña.

De Solminihac, H. y Echeverría, G. (1987). Comparación de los criterios de los métodos

de diseño AASHTO de 1972 y 1986. *Acta III Congreso CHILENO de Ingeniería de Transporte*, 6177, 389-408.

Higuera Sandoval, C. H. (2010). *Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras (vol II)*. Tunja: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón (2006). *Manual de diseño de pavimentos AASHTO 93* (3 ed). La Paz: Autor.

Instituto Nacional de Vías (Invías) (1998). *Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito*. Popayán: Autor.

Instituto Nacional de Vías (Invías) (2008). *Manual de diseño de pavimentos de concreto en vías con medios y altos volúmenes de tránsito*. Bogotá: Autor.

Jiménez Ochoa, H. E. (1997). *Guías de clase sobre métodos de diseño de pavimentos*. Tunja: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Kendall, K. E., y Kendall, J. E. (2011). *Análisis y diseño de sistemas* (8.ª ed.). Ciudad de México: Pearson.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú (2014). *Manual de carreteras: suelos, geología, geotecnia y pavimentos*. Lima: Autor.

Rincón Ochoa, G. É. (2017). *Aplicativo informático para el diseño estructural de pavimentos flexibles y rígidos por el método AASHTO*. Tunja: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Van Til, C. J., McCullough, B. F., Vallerga, B. A. y Hicks, R. G. (1972). *Evaluation of AASHTO interim guides for design of pavements structures*. Oakland: Highway Research Board.

Vásquez Varela, L. R. (2012). *Curso de actualización en pavimentos*. Manizales: Secretaría de Infraestructura.