



**AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS MECANICISTAS PARA EL DISEÑO DE  
PAVIMENTOS FLEXIBLES**

Jerónimo López Orrego

Informe final de semestre de industria para optar al título de Ingeniero Civil

Asesor

Claudia Helena Muñoz hoyos, PhD en Ingeniería Civil

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, escuela ambiental

pregrado

Medellín

2022

---

Cita

(López Orrego, 2022)

---

Referencia

López Orrego, J. (2022). *AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS MECANICISTAS PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES* [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia).

Estilo APA 7 (2020)

---



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboleda Céspedes.

**Decano/Director:** Jesús Francisco Vargas Bonilla.

**Jefe departamento:** Diana Catalina Rodríguez Loaiza.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## **Dedicatoria**

A mi padre y familia.

## **Agradecimientos**

Agradezco a la empresa AIM ingenieros civiles S.A.S por su confianza y formación brindada durante la realización de las prácticas académicas, los doctores Carlos Arredondo y María Marleny Flórez por su valiosa Orientación, a cada uno de los docentes de la Universidad de Antioquia que me formaron en las diferentes áreas de conocimiento y en especial a mis asesores Alejandro Urbina y Claudia Muñoz por todo su acompañamiento, apoyo y experiencia brindada durante todo este proceso.

## Tabla de contenido

Resumen	8
Abstract	9
Introducción	10
1 Objetivos	12
1.1 Objetivo general	12
1.2 Objetivos específicos	12
2 Marco teórico	13
2.1 Metodología empírica AASTHO 93	13
2.2 Metodología Racional Instituto del asfalto y criterio La Shell	18
3 metodología	23
4 Resultados	25
4.1 Método AASHTO 93	25
4.2 Modelo estructural, datos de salida	27
4.3 Validación mediante el método racional	29
4.4 Verificación y resumen de las alternativas diseñadas	31
4.4 Reporte del diseño	32
5 Análisis	33
6 Conclusiones	35
Referencias	37
Anexos	38

## Lista de tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Valores de confiabilidad R.</i>	15
<b>Tabla 2</b> <i>Valores de desviación estándar Zr.</i>	15
<b>Tabla 3</b> <i>Valores de error estándar So.</i>	16
<b>Tabla 4</b> <i>Serviciabilidad inicial y final.</i>	16
<b>Tabla 5</b> <i>Factores de seguridad.</i>	22

## Lista de figuras

<b>Figura 1</b> <i>Interfaz método AASHTO 93</i>	26
<b>Figura 2</b> <i>Interfaz modelo estructural</i>	28
<b>Figura 3</b> <i>Interfaz validación método racional</i>	30
<b>Figura 4</b> <i>Interfaz verificación alternativas diseñadas</i>	31
<b>Figura 5</b> <i>Interfaz resumen alternativas diseñadas</i>	31
<b>Figura 6</b> <i>Interfaz de resultados</i>	36

## **Siglas, acrónimos y abreviaturas**

<b>AASHTO</b>	American Association of State Highway and Transportation Officials
<b>INA</b>	Instituto Nacional del asfalto (Asphalt Institute)
<b>SN</b>	Structural Number (número estructural)
<b>INVIAS</b>	Instituto nacional de vías

## **Resumen**

El presente informe describe la metodología desarrollada para llevar a cabo la realización de una hoja de cálculo que permite automatizar las ecuaciones, teorías y modelos requeridos para el análisis y diseño de pavimentos tipo flexibles mediante el uso de macros, formulas y comandos los cuales, a partir de parámetros de entrada, verifica que estos cumplan con las especificaciones requeridas y entrega resultados tales como el dimensionamiento de la estructura de pavimento y la validación de los modelos empleados, con el fin de optimizar y reducir los tiempos que toma realizar el diseño y análisis de pavimentos, además de consolidar toda la información en un reporte que puede ser entregado a modo de informe. Como resultado, se entrega una hoja de cálculo de Excel a modo de programador, la cual funciona correctamente y cumple con los objetivos planteados, permitiendo la realización del diseño de pavimento y la entrega de resultados los cuales pueden ser entregados en los informes de diseño solicitados de manera consolidada.

*Palabras clave:* Pavimento flexible, método racional, método empírico, procesos mecanicistas, dimensionamiento, macros, automatización, Instituto del Asfalto, Criterio la Shell, Método AASHTO93.

### **Abstract**

This report describes the methodology developed to carry out the realization of a spreadsheet that allows to automate the equations, theories and models required for the analysis and design of flexible type pavements through the use of macros, equations and commands which, at based on input parameters, verifies that these comply the required specifications and delivers results such as the dimensioning of the pavement structure and the validation of the models used, in order to optimize and reduce the time it takes to carry out the design and analysis of pavements, in addition to consolidating all the information in a report that can be delivered as a report. As a result, an Excel spreadsheet is delivered as a programmer, which works correctly and comply the stated objectives, allowing the pavement design to be carried out and the delivery of results, which can be delivered in the requested design reports in a consolidated way.

*Keywords:* Flexible pavement, rational method, empirical method, mechanistic processes, dimensioning, macros, automation, Asphalt Institute, Shell Criteria, AASHTO93 Method.

## **Introducción**

ARREDONDO MADRID INGENIEROS CIVILES S.A.S es una empresa con más de 40 años de experiencia en servicios de ingeniería, específicamente en interventoría en obras civiles y concesiones viales, consultoría en estudios y diseños, asesorías técnicas, administración vial y administración de proyectos.

Dentro de sus múltiples especialidades se encuentra el área de pavimentos y auscultación de vías, aportando de su conocimiento y experiencia en los estudios de suelos y auscultación necesarios para el diseño de estructuras de pavimentos de vías nuevas y vías existentes, determinando alternativas para la construcción, mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción, definiendo los espesores de los materiales más adecuados, en función de las características mecánicas y de resistencia de los materiales a través de modelaciones basadas en procesos mechanicistas para el diseño de pavimentos tipo flexible, rígido y articulado.

Para ello, hacen uso de softwares de diseño en los cuales se ingresan los parámetros mecánicos de todas las capas que componen o compondrá un pavimento previamente evaluado, los cuales arrojan resultados según las necesidades acordes a las especificaciones técnicas y las condiciones regionales donde se hacen los diseños, que permiten el análisis y validación de los diseños planteados mediante hojas de cálculo las cuales serán presentadas posteriormente en informes que serán entregados a las diferentes entidades que los contrata.

Estas hojas de cálculo, contiene las ecuaciones de diseño y validación de diferentes metodologías en diferentes tablas para las cuales, se deben ingresar de forma manual en cada una de estas, todos los parámetros requeridos para el desarrollo de las ecuaciones los cuales, muchas veces son repetitivos, perdiendo así eficiencia en el desarrollo y análisis de los diseños los cuales son limitados por el cronograma de actividades y tiempos de entrega de los proyectos. Además, los formatos en de cada una de las tablas son diferentes entre sí y no mantienen el mismo estilismo o uniformidad, y se presentan en los informes de manera individual, aumentando las páginas de contenido lo cual puede volverse contraproducente a la hora de hablar de eficiencia y atención por parte del lector.

De acuerdo al antecedente planteado, se realiza esta propuesta la cual, busca mejorar el manejo de datos y presentación de informes a través de la automatización de cálculos por medio de tablas dinámicas y ejecución de macros que permitan, de una manera más ordenada y eficiente, generar reportes que puedan ser presentados en los informes y a la vez, contar con un formato que facilite a la empresa desarrollar el análisis respectivo de los diseños solicitados, específicamente para los diseños de pavimento tipo flexible ya que requieren de un análisis más amplio y variable.

La propuesta constará de una interfaz que permita el ingreso de los parámetros previamente evaluados en campo o laboratorio, hipótesis iniciales y resultados de esfuerzos y deformaciones obtenidos de softwares necesarios para el análisis del pavimento, que mediante la programación de ecuaciones de diferentes criterios o modelos de falla, arroje los resultados que validen o rechacen las alternativas propuestas según las hipótesis planteadas y genere un reporte general que integre todos los resultados obtenidos y puedan ser presentados en los informes que AIM entrega a sus clientes.

## **1 Objetivos**

### **1.1 Objetivo general**

Desarrollar una interfaz por medio de tablas dinámicas y macros que permitan mediante el uso de ecuaciones de teorías mecanicistas, entregar el análisis del diseño de pavimentos tipo flexibles de una forma organizada y automatizada.

### **1.2 Objetivos específicos**

- Programar las ecuaciones necesarias por el método AASTHO 93 que permitan calcular el número estructural.
- Programar los modelos de falla establecidos para cada material que compone la estructura de un pavimento para posteriormente compararlos con el tránsito de diseño.
- Generar una interfaz en una hoja de cálculo que permita un análisis más fácil y eficiente, que pueda ser presentado en los informes que se entregan a las entidades.
- Graficar automáticamente la estructuración de los diseños validados y que cumplen con los criterios de diseño, estableciendo las propiedades de las capas, espesores y material requerido.
- Generar un reporte automático con los resultados obtenidos para ser presentados posteriormente en los informes.

## **2 Marco teórico**

Un pavimento debe ser diseñado de tal manera que las cargas impuestas por el tránsito no generen deformaciones permanentes excesivas. En el caso de los pavimentos flexibles estas deformaciones se producen en cada una de las capas. Las metodologías de diseño de pavimentos flexibles son generalmente de carácter empírico o analíticos/racionales (Rondón & Reyes, 2007).

Los métodos empíricos correlacionan el comportamiento de los pavimentos in situ, a través de observaciones y mediciones de campo, con los factores que causan los mecanismos de degradación en estas estructuras. Dentro de los factores más importantes están las cargas impuestas por el tránsito, las condiciones ambientales a las cuales se encuentra sometida la estructura, el tipo de suelo o suelo de subrasante, la calidad de los materiales empleados y deficiencias durante el proceso constructivo. Todos estos factores son controlados y medidos durante las fases de estudio para correlacionarlos con los mecanismos de degradación y crear así el método de diseño (Rondón & Reyes, 2007). Dentro de las metodologías de diseño se encuentra la AASHTO 93, la cual inició como una guía provisional para el diseño de pavimentos rígidos y flexibles, basado en los procedimientos de diseño, posteriormente luego de algunos años de uso en 1986 se incorporaron nuevas consideraciones en los que se encuentra la confiabilidad de diseño, los módulos de elasticidad de la Subrasante y las capas de pavimento, factores ambientales, de drenaje y el diseño de tipo empírico (López, 2015).

### **2.1 Metodología empírica AASTHO 93**

El método de diseño AASHTO, está basado primordialmente en identificar o encontrar un número estructural denominado en el contexto como “SN” que pueda soportar el nivel de carga solicitado. Para determinar este número, el método proporciona la ecuación siguiente (AASHTO, s.f):

**Ecuación 1***Número estructural.*

$$\log N = Z_r * S_o + 9,36 \log(SN + 1) - 0,20 + \left[ \frac{\log \left[ \frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right]}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} \right] + 2,32 \log MR - 8,07$$

*Nota.* Fuente: AASHTO, "AASHTO guide for design of pavement structures", Washington D.C.

Donde:

N= tránsito en ejes equivalentes a 8,2 ton

Z<sub>r</sub>= desviación estándar normal

S<sub>o</sub>= error normal

ΔPSI= dif. entre el índice de servicialidad inicial y final.

MR= módulo resiliente de la subrasante en [PSI]

SN= número estructural requerido del espesor total del pavimento

Suministrando el módulo dinámico para los materiales asfálticos y resiliente para los materiales granulares, en cada nivel de la estructura proyectada, se puede determinar los espesores de los materiales asfálticos requeridos para proteger cada capa individualmente (AIM, 2022).

- El parámetro de confiabilidad "R"

En el método, la confiabilidad está en función del error normal y la desviación estándar y trata de lograr un cierto grado de confianza en el cálculo entregado, ósea, en el espesor total de la estructura, y asegurar que las diversas alternativas de selección estructural que se obtengan durarán como mínimo el periodo de diseño. En el algoritmo de cálculo, este parámetro se liga con la desviación estándar Z<sub>r</sub> y el error normal S<sub>o</sub> asignado por efectos o errores en el cálculo del tránsito. El factor de confiabilidad del diseño tiene en cuenta las variaciones al azar, tanto en la predicción del tránsito como en la predicción del comportamiento y por lo tanto proporcionan un nivel de confianza (R) para que los tramos de pavimento sobrevivan al periodo por el cual fueron diseñados. Con el nivel de confiabilidad que se le dé al diseño, se obtienen valores de variación en la predicción del comportamiento del pavimento S<sub>o</sub> y los valores de desviación estándar Z<sub>r</sub>, dichos

valores dependen de las condiciones de la vía, tal como se muestra en las siguientes tablas (AIM, 2022, p. 12).

**Tabla 1**

*Valores de confiabilidad R.*

Clasificación funcional	Nivel de confiabilidad recomendado	
	Urbana	Rural
Autopistas interestatales y otras	85 – 99.9	80 – 99.9
Arterias principales	80 – 99	75 – 95
Colectoras de tránsito	80 – 95	75 – 95
Carreteras locales	50 – 80	50 – 80

*Nota.* Fuente: AASHTO, “*AASHTO guide for design of pavement structures*”, Washington D.C.

**Tabla 2**

*Valores de desviación estándar  $Z_R$ .*

Confiabilidad R (%)	$Z_R$	Confiabilidad R (%)	$Z_R$
50	-0.000	93	-1.476
60	-0.253	94	-1.555
70	-0.524	95	-1.645
75	-0.674	96	-1.751
80	-0.841	97	-1.881
85	-1.037	98	-2.054
90	-1.282	99	-2.327
91	-1.340	99.9	-3.090
92	-1.405	99.99	-3.750

*Nota.* Fuente: AASHTO, “*AASHTO guide for design of pavement structures*”, Washington D.C.

**Tabla 3**

*Valores de error estándar So.*

Caso de análisis	Error estándar combinado	
	Pavimento flexible	Pavimento rígido
	0.40 – 0.50	0.30 – 0.40
Considerando la varianza del tránsito futuro	0.49	0.39
Sin considerar la varianza del tránsito futuro	0.44	0.34

*Nota.* Fuente: AASHTO, “*AASHTO guide for design of pavement structures*”, Washington D.C.

- Serviciabilidad ( $\Delta$ PSI).

Definida como la capacidad del pavimento para brindar un uso confortable y seguro a los usuarios. Se expresa en términos de índice de serviciabilidad presente (AIM, 2022, p. 14).

**Tabla 4**

*Serviciabilidad inicial y final.*

Tipo de carretera	Índice de serviciabilidad			
	Pavimento flexible		Pavimento rígido	
	P <sub>i</sub>	P <sub>f</sub>	P <sub>i</sub>	P <sub>f</sub>
Carreteras principales	4.2	2.5	4.5	2.5
Carreteras secundarias		2.0		2.0
Condición de falla		1.5		1.5

*Nota.* Fuente: AASHTO, “*AASHTO guide for design of pavement structures*”, Washington D.C.

- Módulo resiliente de la subrasante:

Es la capacidad de soporte del suelo sobre el cual descansará toda la estructura del pavimento. El módulo resiliente de la subrasante se estimará usando correlaciones entre el ensayo de CBR con ecuaciones propuestas por el método AASHTO (AASHTO, s.f).

### **Ecuación 2**

*Módulo resiliente.*

$$MR_{ste} = 2555 * CBR^{0.64}$$

*Nota.* Fuente: AASHTO, "AASHTO guide for design of pavement structures", Washington D.C.

Donde:

CBR=resistencia de diseño de la subrasante en %

MR<sub>ste</sub>= módulo resiliente de la subrasante [PSI].

- Tránsito de diseño

Se trata de una variable independiente estudiada en un volumen diferente. Está en función del volumen de tráfico esperado en el periodo de diseño y para el carril de diseño y se entrega en relación al daño representativo que hace un eje estándar simple de rueda doble, con una carga de 82kN (AIM, 2022, p. 15).

- Determinación de espesores. Cálculo de SN suministrado

### **Ecuación 3**

*SN suministrado (SN\*).*

$$SN^x = \sum_{i=1}^n H_i * a_i * m_i$$

Donde:

N= número de capas

H<sub>i</sub>= espesor capa i

a<sub>i</sub>= coeficiente de aporte estructural capa i

m<sub>i</sub>= coeficiente de drenaje capa i

El número estructural suministrado se obtiene mediante la iteración hasta igualar o superar por un valor porcentual establecido, al número estructural obtenido la ecuación general. Los espesores asumidos son los requeridos por el método y por tanto los que se necesita para transitar de acuerdo con las condiciones actuales de la subrasante. Se debe cumplir lo siguiente:

#### **Ecuación 4**

*Cumplimiento de SN.*

$$\text{si } SN^x \cong SN \text{ la estructura propuesta cumple}$$

*Nota.* Fuente: AASHTO, “*AASHTO guide for design of pavement structures*”, Washington D.C.

A diferencia de los métodos empíricos, los métodos analíticos consideran el estado de esfuerzo y deformación que experimentan cada una de las capas que conforman la estructura del pavimento y como estas influyen en el comportamiento del mismo. Para el cálculo de esfuerzos y deformaciones, se emplean programas de computador disponibles desde la década de los 60's (KANDHAL & CROSS, 1992), en estos programas se introducen la carga, la presión de contacto, las propiedades mecánicas de los materiales (por lo general el módulo elástico y la relación de Poisson) y el espesor de las capas del pavimento con el fin de obtener los estados de esfuerzo y deformación. Una vez calculados estos estados, se comparan con aquellos que admite el pavimento para la vida útil proyectada, y en un procedimiento de ensayo y error (aumentando o disminuyendo por lo general los espesores de capas) se dimensionan las capas que conformarán la estructura de pavimento. (Rondón & Reyes, 2007).

## **2.2 Metodología Racional Instituto del asfalto y criterio La Shell**

Los resultados obtenidos en los métodos analíticos, pueden ser comparados con leyes de fatiga con el fin de asociar los esfuerzos y deformaciones con el tráfico que puede soportar la estructura de pavimento durante su vida útil. Desde el punto de vista del diseño, es necesario conocer la respuesta del pavimento en puntos críticos del mismo (Coria et al, 2018). Existen una gran variedad de modelos de deterioro tanto por fatiga como por deformación permanente, elaborados por distintas agencias de transporte y de investigación de carreteras alrededor del mundo (Coria et al, 2018), algunos de los modelos de falla son los estudiados en la ley de

comportamiento a la fatiga de la mezcla asfáltica - criterio de Instituto Norteamericano del Asfalto (INA), Nueva metodología mecánico-empírico de AASHTO y Criterio de la Shell.

Estos modelos consideran el pavimento como un sistema elástico multicapa (Capa de rodadura y base de concreto asfáltico, capa de rodadura y bases con emulsiones asfálticas, así como capa de rodadura asfáltica con base y subbase granulares), en los cuales se utilizan conceptos teóricos, experimentales, resultados de ensayos de laboratorios y programas de computador que permiten optimizar los espesores de la estructura de pavimento y el chequeo del cumplimiento de los criterios de fatiga y ahuellamiento. El dimensionamiento de la estructura de pavimento que se diseñe, debe cumplir que las deformaciones por tracción producidas en la fibra inferior de las capas asfálticas, materiales cementados o estabilizados y las deformaciones verticales por compresión en la parte superior de la subrasante, no superen los valores admisibles dados por el tránsito de diseño que debe soportar la estructura para el periodo de servicio definido (Salamanca & Zuluaga, 2014).

- Mezcla asfáltica

La capacidad mecánica de una mezcla asfáltica está dada en función del Módulo Dinámico del material, los parámetros típicos de mezclas producidas en la zona del proyecto, condiciones climáticas tales como la temperatura del pavimento y frecuencia de carga o velocidad de operación (AIM, 2022).

- Materiales granulares

El módulo de resistencia será estimado con el modelo de Barker, Brabston & Chou, partiendo del módulo de resiliencia de la capa de apoyo y de los espesores de cada capa según el modelo proyectado.

**Ecuación 5**

*Módulo de resistencia material granular.*

$$E_{(n)} = \{A \times \log_{10}[h_{(n)}] + B \times \log_{10}[E_{(n-1)}] - C \times \log_{10}[h_n] \times \log_{10}[E_{(n-1)}] - D\}$$

*Subbase granular. A=5.35 B=0.62 C=1.56 D=1.13.*

*Base granular. A=8.05 B=0.84 C=2.10 D=2.21*

Donde:

En= módulo de la capa superior sobre la que se quiere estimar el módulo elástico  $\left[\frac{Kg}{cm^2}\right]$

hn= espesor de la capa superior [cm]

En-1= módulo de la capa inferior sobre la que se conoce el módulo elástico  $\left[\frac{Kg}{cm^2}\right]$

- Suelo de subrasante

El módulo resiliente de la subrasante, sobre la cual descansará toda la estructura del pavimento, se estimará usando correlaciones entre el ensayo de CBR con ecuaciones propuestas por la compañía Shell (Shell, 1978).

**Ecuación 6**

*Módulo resiliente de la subrasante.*

$$MR_{ste} = 2555 * CBR^{0.64}$$

Donde:

CBR=resistencia de diseño de la subrasante en %

MRste= módulo resiliente de la subrasante [PSI]. (Factor de conversión a Kg/cm<sup>2</sup> de 1PSI= 0.07Kg/cm<sup>2</sup>)

Como fue mencionado anteriormente, Los modelos de falla que se usarán para el chequeo de las estructuras son las estudiadas en la ley de comportamiento a la fatiga de la mezcla asfáltica - criterio de Instituto Norteamericano del Asfalto y criterio de la Shell.

El modelo de agrietamiento por fatiga propuesto por el Instituto Norteamericano del Asfalto para carpeta asfáltica y subrasante es el siguiente (INVIAS, 2015):

### Ecuación 7

Fórmula INA (Asphalt Institute, 1991) carpeta asfáltica.

$$Nf = 0.00432 * K * C * Emix^{-0.854} * \varepsilon_{r1}^{-3.291}$$

Dónde:

$$C = 10^M$$

$$M = 4.84 * \left[ \frac{Vb}{Va + Vb} - 0.6875 \right]$$

Vb= porcentaje de volumen de asfalto en la mezcla

Va= porcentaje de vacíos con aire en la mezcla asfáltica

K= factor de calage = 18.4

Emix= módulo de la mezcla asfáltica en PSI

$\varepsilon_{r1}$  = Deformación máxima de tracción calculada en la cara inferior de la capa

### Ecuación 8

Fórmula INA (Asphalt Institute, 1991) subrasante.

$$Nf = 1.365 * 10^{-9} \varepsilon_z^{-4.477}$$

Donde:

$\varepsilon_z$ : Deformación de compresión en la cara superior de la subrasante

Nf: Número acumulado de ejes equivalentes de 8.2 ton en el carril de diseño durante el período de diseño y a partir del año de puesta en servicio

El modelo de agrietamiento por fatiga propuesto por el método SHELL, se emplea la fórmula propuesta por Jameson en la preparación de la Guía Austroads en el año 2004, en la cual asignan un factor de confiabilidad “Reliability Factor” (**Tabla 5**), la cual es una función de transferencia que relaciona la vida media de fatiga en laboratorio (Shell, 1978) con la vida de fatiga en servicio predicha, usando en esta parte la confiabilidad deseada del proyecto. (Austroads, 2012)

**Ecuación 9**

*Fórmula Shell (modificada por Jameson año 2001) carpeta asfáltica.*

$$Nf = K \left[ \frac{6918(0.856Vb + 1.08)}{Emix^{0.36} \epsilon_{r1}} \right]^5$$

Dónde:

Vb= porcentaje de volumen de asfalto en la mezcla

K= factor de calage (a partir del factor de confiabilidad)

Emix= módulo de la mezcla asfáltica en Mpa

$\epsilon_{r1}$  = Deformación máxima de tracción calculada en la cara inferior de la capa

**Tabla 5**

*Factores de seguridad.*

**2004 Guide Suggested Reliability Factors (RF) for Asphalt Fatigue**

Desired Project Reliability				
80%	85%	90%	95%	97.5%
2.5	2.0	1.5	1.0	0.67

*Nota.* Fuente: Technical Basis Of Austroads Pavement Design Guide, 2004

Para la subrasante se utilizó la siguiente ley de comportamiento:

**Ecuación 10**

*Fórmula Shell subrasante (Shell, 1978).*

$$\epsilon_{z adm} = 2.13 \times 10^{-2} * N^{-0.25}$$

Donde:

$\epsilon_{z adm}$ : deformación unitaria admisible por compresión en la parte superior de la subrasante en mm/mm.

**N**: número total de ejes sencillos equivalentes acumulados de 8.2 ton en el carril de diseño y durante el período de diseño.

### **3 metodología**

Para lograr los objetivos propuestos, se realizaron las siguientes actividades:

- A.** Inicialmente, se realizó la respectiva consulta del material bibliográfico, para el entendimiento y claridad de los conceptos y ecuaciones necesarias para el diseño del pavimento.
- B.** Se procedió con la programación de las ecuaciones propuestas en el marco teórico de forma manual en hojas de cálculo de Excel y se verificaron mediante la prueba de proyectos anteriormente calculados.
- C.** Se aplicó el criterio por igualación de números estructurales (SN) mediante la ejecución de una macro, la cual, a partir de un SN inicial, se calculó un SN nuevo de forma iterativa hasta que ambas converjan con un margen de diferencia establecido.
- D.** Se comenzó a ejecutar las interfaces de diseño, donde se ingresan los datos de entrada y por medio de macros, generar la posibilidad de insertar hasta 3 alternativas de diseño según sea la necesidad del diseñador. Para ello, se realizaron hojas de cálculos con los formatos de cada una de las interfaces diseñadas, las cuales reciben los valores ingresados desde las interfaces de diseño y están programadas con las fórmulas y vínculos necesarios para el desarrollo de las ecuaciones propuestas. Estos formatos, serán los que las macros procesarán y entregarán en las interfaces de diseño. El diseño de estas interfaces, se ajustan a la escala de colores empresarial en la cual predominan los azules, verdes y se contrastan con grises.
- E.** Se asociaron los valores de entrada ingresados a celdas específicas, las cuales generan las ecuaciones programadas mediante la creación de macros que, mediante funciones específicas de rango y selección de celdas, ejecutan las fórmulas o comandos requeridos.
- F.** Se continuó con la programación de botones de cálculo, los cuales ejecutan las macros programadas. Estas se diseñaron mediante la inserción de cuadros de texto con formatos de relleno y contorno a los cuales se asociaron las macros de modo que, al hacer clic en ellos, las macros se ejecuten.

**G.** Posteriormente, se continuó con la programación de otra interfaz que muestra los resultados obtenidos, para ello, se programó una macro que copia las tablas de resultados de las interfaces diseñadas y las pega en la nueva interfaz la cual recopila estas tablas, depura la información vacía (capas o alternativas que no se emplearán) y las organiza a modo de informe.

**H.** Se programó también, macros con cuadros de ayuda que muestran al diseñador tablas de rangos de referencia, las cuales se enumeran en el marco teórico. Estos cuadros se realizaron con ayuda de Userform en las cuales se pueden adjuntar las tablas de referencia en formato JPEG y se activan por medio de botones los cuales fueron diseñados en forma de signo de interrogación (?).

**I.** Se generó también, cuadros de dialogo con notificaciones de diseño tales como el rango de alternativas de diseño, cumplimiento de diseños, entre otros.

**J.** En todo momento, se verificó que las macros y ecuaciones funcionaran correctamente y se solucionaron de manera simultánea los errores que se presentaron durante la ejecución del proyecto.

**K.** Para un mejor entendimiento del proyecto, se elaboró un manual y guía de usuario en el cual se explica de manera mas detallada el uso de la hoja de cálculo (programador) y el funcionamiento de cada una de las interfaces y macros ejecutadas. Además, sirve de soporte al presente informe.

El funcionamiento de los comandos y rutinas programadas para la ejecución de las macros se explican en el manual de uso el cual se puede observar en la sección de Anexos, y describe de manera más detallada la metodología realizada. a continuación, se presentan los resultados de las interfaces realizadas.

## 4 Resultados

A continuación, se presenta cada una de las interfaces realizadas las cuales permiten el funcionamiento del proyecto a modo de programador de diseño. En el manual de Uso se describe de manera más detallada cada una de estas interfaces la cual puede encontrarse en la sección de anexos.

### 4.1 Método AASHTO 93

A continuación, se presenta en la **Figura 1**, la interfaz de diseño de entrada, donde se ingresarán los parámetros de diseño, y permitirá al diseñador realizar máximo tres alternativas de diseño las cuales, en esta primer fase, pueden ser comparadas mediante el método AASTHO 93, para ello se programó mediante el uso de fórmulas en celdas las ecuaciones 1 y 3, y por medio de macros, la convergencia del SN requerido, el número de alternativas a diseñar y la incorporación de cuadros de ayudas en parámetros tales como parámetro R, Error estándar  $S_o$  y coeficientes de aporte, los cuales el diseñador puede consultar en caso de no conocer el valor requerido según la especificación del diseño. Una vez el diseñador verifique los diseños mediante la ecuación 4, podrá continuar con la validación por el método racional.

**Figura 1**  
Interfaz método AASHTO 93

		<b>DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE PROYECTO</b>				Numero de Alternativas a Diseñar (máximo 3)		NOMBRE DEL PROYECTO		
						AGREGAR				
<b>DATOS DE ENTRADA</b>										
TRANSITO EN EJES EQUIVALENTES N		CONFIABILIDAD	PARÁMETRO R		CALCULAR TOTAL NUMERO ESTRUCTURAL REQUERIDO	#!NUM!				
SERVICIABILIDAD	INICIAL		DESVIACIÓN ESTÁNDAR ZR	#N/D						
	FINAL		ERROR ESTÁNDAR S <sub>o</sub>							
CBR DE DISEÑO %		SN INICIAL								
<p>LogW18= Aplicaciones de carga de un eje equivalente a un tiempo t para alcanzar un psi=pt:                  SN=Número estructural;                  ΔPSI= serviciabilidad inicial (pi) menos la final (pt);                  MR= módulo resiliente del suelo (A partir del CBR).</p>		<p><b>ECUACIÓN DE DISEÑO</b></p> $\log W_{18} = Z_R S_o + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log \left[ \frac{\Delta PSI}{(4.2 - 1.5)} \right]}{0.4 + 1094} + 2.32 \log MR - 8.07$ <p>Para todas las alternativas se usó el criterio de diseño por igualación de números estructurales</p>								
<b>DISEÑO DE LAS CAPAS</b>										
MATERIALES	CARACTERÍSTICAS		COEFICIENTES DE DISEÑO				ALTERNATIVAS			
	MODULO (PSI)	CBR (%)	ESTRUCTURALES a <sub>i</sub>	?	DRENAJE m <sub>i</sub>	?				
RODADURA	0	NA					NO APLICA			
BASE ASFÁLTICA	0									
BASE GRANULAR	0									
SUBBASE GRANULAR	0									
AFIRMADO	0									
SUBRASANTE	0	0.0	NO APLICA		NO APLICA					
							CONTINUAR			

Nota. Elaboración propia.

#### 4.2 Modelo estructural, datos de salida

En esta interfaz, el diseñador deberá ingresar los coeficientes de Poisson de cada una de las capas de la estructura con el fin de que el programa pueda almacenar estos datos y presentar tabla con los datos que el diseñador deberá ingresar a programas de cálculos de esfuerzos y deformaciones, estos se presentan en los sistemas de unidades más comunes usados en estos programas. La interfaz comprende de tres botones los cuales completan y muestran la tabla del modelo estructural con los datos ingresados, depura la información vacía o capas que no serán utilizadas en el diseño y el paso a la siguiente interfaz de validación de esfuerzos respectivamente. En la **Figura 2** se presenta la interfaz y en la sección de Anexos se explican las macros realizadas para esta interfaz.

**Figura 2**  
*Interfaz modelo estructural*

VALORES DE POISSON DE LAS CAPAS		COMPLETAR MODELO ESTRUCTURAL										
RODADURA	μ											
BASE ASFÁLTICA	μ											
BASE GRANULAR	μ											
SUBBASE GRANULAR	μ											
AFIRMADO	μ											
SUBRASANTE	μ											
CONTINUAR												
<b>DATOS DE INGRESO AL PROGRAMA DE CÁLCULOS DE ESFUERZOS</b>												
MATERIAL		EN Kg/cm2				EN MPA				EN PSI		
		Alt 1	Alt 2	Alt 3		Alt 1	Alt 2	Alt 3		Alt 1	Alt 2	Alt 3
RODADURA	E (Kg/cm2)	#REF!	#REF!	#REF!	E (Kg/cm2)	#REF!	#REF!	#REF!	E (Kg/cm2)	#REF!	#REF!	#REF!
	μ	0	0	0	μ	0	0	0	μ	0	0	0
	espesor (cm)	0,00	0,00	0,00	espesor (cm)	0,00	0,00	0,00	espesor (cm)	0,00	0,00	0,00
BASE ASFÁLTICA	E (Kg/cm2)	0	0	0	E (Kg/cm2)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	E (Kg/cm2)	0,00	0,00	0,00
	μ	0	0	0	μ	0	0	0	μ	0	0	0
	espesor (cm)	0,0	0,0	0,0	espesor (cm)	0,00	0,00	0,00	espesor (cm)	0,00	0,00	0,00
BASE GRANULAR	E (Kg/cm2)	0	0	0	E (Kg/cm2)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	E (Kg/cm2)	0,00	0,00	0,00
	μ	0	0	0	μ	0	0	0	μ	0	0	0
	espesor (cm)	0,0	0,0	0,0	espesor (cm)	0,00	0,00	0,00	espesor (cm)	0,00	0,00	0,00
SUBBASE GRANULAR	E (Kg/cm2)	0	0	0	E (Kg/cm2)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	E (Kg/cm2)	0,00	0,00	0,00
	μ	0	0	0	μ	0	0	0	μ	0	0	0
	espesor (cm)	0,0	0,0	0,0	espesor (cm)	0,00	0,00	0,00	espesor (cm)	0,00	0,00	0,00
AFIRMADO	E (Kg/cm2)	0	0	0	E (Kg/cm2)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	E (Kg/cm2)	0,00	0,00	0,00
	μ	#REF!	#REF!	#REF!	μ	#REF!	#REF!	#REF!	μ	#REF!	#REF!	#REF!
	espesor (cm)	#REF!	#REF!	#REF!	espesor (cm)	#REF!	#REF!	#REF!	espesor (cm)	#REF!	#REF!	#REF!
SUBRASANTE	E (Kg/cm2)	#REF!	#REF!	#REF!	E (Kg/cm2)	#REF!	#REF!	#REF!	E (Kg/cm2)	#REF!	#REF!	#REF!
	μ	#REF!	#REF!	#REF!	μ	#REF!	#REF!	#REF!	μ	#REF!	#REF!	#REF!
	espesor (cm)	#REF!	#REF!	#REF!	espesor (cm)	#REF!	#REF!	#REF!	espesor (cm)	#REF!	#REF!	#REF!

Nota. Elaboración propia.

### 4.3 Validación mediante el método racional

En esta interfaz, el diseñador podrá ingresar los valores de esfuerzo en la capa de rodadura y subrasante obtenidos en los programas de cálculo, además de definir el espesor del suelo de mejoramiento (en caso de ser necesario) y el criterio de falla con el que desee verificar los esfuerzos, en este caso, puede elegir entre los criterios de INA, SHELL o el promedio de ambas (esto mediante el uso de listas desplegables). Definiendo los porcentajes de volumen de la mezcla y valores de calage para el criterio escogido (estos datos también cuentan con cuadros de ayuda), una vez definidos los datos, podrá encontrar la tabla con los respectivos consumos según el criterio elegido y verificar si estos se encuentran dentro de los rangos permitidos en los que la estructura diseñada se considera válida. A continuación, se presenta en la **Figura 3**, la interfaz de validación.

**Figura 3**  
*Interfaz validación método racional*

VERIFICACIÓN DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES			
	ALT 1	ALT 2	ALT 3
INGRESA EL ESFUERZO EN LA CARPETA ASFÁLTICA (ET)			
INGRESA EL ESFUERZO EN LA SUBRASANTE (EZ)			
SUELO DE MEJORAMIENTO (cm)	0	0	0
CARACTERISITICAS DE MEZCLA SHELL		CARACTERISITICAS DE MEZCLA INA	
Vb	?	Vb	?
E (Mpa)	0	Va	?
E (Kg/cm2)	0	E (EN PSi)	0
E (EN N/m2)	0.E+00	E (EN Kg/cm2)	0
K	?	K	18.4
C	#,DM/0!	C	#,DM/0!
SELECCIONA EL MÉTODO DE VALIDACIÓN	PROMEDIO		
VALIDAR		CONTINUAR	

ALTERNATIVA	ESPEORES CM							REPETICIONES ESPERADAS	PERIODO DE DISEÑO	ALTERNATIVA	INA				SHELL				PROMEDIO		CONSUMOS		OBSERVACION			
	RODADURA	BASE ASFÁLTICA	BASE	SUBBASE	AFIRMADO	SUELO DE MEJORAMIENTO	TOTAL				ESFUERZOS Y DEFORMACIONES		ESFUERZOS Y DEFORMACIONES		ESFUERZOS Y DEFORMACIONES		ESFUERZOS Y DEFORMACIONES		RODADURA	SUBRASANTE	RODADURA	SUBRASANTE				
											RODADURA	SUBRASANTE	RODADURA	SUBRASANTE	RODADURA	SUBRASANTE	RODADURA	SUBRASANTE	RODADURA	SUBRASANTE						
											ET	EZ	ET	EZ	ET	EZ	ET	EZ	ET	EZ	ET	EZ		ET	EZ	ET
1						0.0	0.0	0.0E+00	10	1	0.00E+00	#,DM/0!	0.00E+00	#,DM/0!	0.00E+00	#,DM/0!	0.00E+00	#,DM/0!	#,DM/0!	#,DM/0!	#,DM/0!	#,DM/0!	#,DM/0!	#,DM/0!	#,DM/0!	#,DM/0!
2						0.0	0.0	0.0E+00	10	2	0.00E+00	#,DM/0!	0.00E+00	#,DM/0!	0.00E+00	#,DM/0!	0.00E+00	#,DM/0!	#,DM/0!	#,DM/0!	#,DM/0!	#,DM/0!	#,DM/0!	#,DM/0!	#,DM/0!	#,DM/0!
3						0.0	0.0	0.0E+00	10	3	0.00E+00	#,DM/0!	0.00E+00	#,DM/0!	0.00E+00	#,DM/0!	0.00E+00	#,DM/0!	#,DM/0!	#,DM/0!	#,DM/0!	#,DM/0!	#,DM/0!	#,DM/0!	#,DM/0!	#,DM/0!

Nota. Elaboración propia.

#### 4.4 Verificación y resumen de las alternativas diseñadas

Una vez, verificadas las estructuras tanto por método empírico como racional, el diseñador podrá ver una tabla resumen con los espesores de las alternativas diseñadas, información de tránsito, CBR y la opción de emplear o no geotextil de separación el cual se emplea con el fin de proteger las capas granulares de la subrasante y brindar mayor resistencia, una vez validados los datos, podrá definir la clase de base, subbase y tipo de mezcla a emplear y podrá ver una tabla resumen con los valores definitivos, depurando las capas y alternativas que no se usarán. En la **Figura 4** y **Figura 5** se presentan las interfaces de verificación y resumen y en la sección de Anexos la explicación del funcionamiento de las macros realizadas.

**Figura 4**

*Interfaz verificación alternativas diseñadas*

RESUMEN ALTERNATIVAS PARA CONSTRUCCIÓN										
Alternativa	Ejes W <sub>18</sub>	CBR <sub>dis</sub> (%)	Geotextil	Suelo de mejoramiento 10%	Afirmado	SBG CLASE C	BG CLASE B	Base Asfáltica	MDC-19	Total
			1	0,00,E+00	0,0%	OPCIONAL	0			
2	0,00,E+00	0,0%	OPCIONAL	0						0,0
3	0,00,E+00	0,0%	OPCIONAL	0						0,0

**VER RESUMEN**

*Nota.* Elaboración propia.

**Figura 5**

*Interfaz resumen alternativas diseñadas*

**BORRAR ALT.**    **DEPURAR**    **VER REPORTE**

RESUMEN ALTERNATIVAS PARA CONSTRUCCIÓN										
Alternativa	Ejes W <sub>18</sub>	CBR <sub>dis</sub> (%)	Geotextil	Suelo de mejoramiento 10%	Afirmado	SBG CLASE C	BG CLASE B	Base Asfáltica	MDC-19	Total
			1	0,00,E+00	0,0%	OPCIONAL	0			
2	0,00,E+00	0,0%	OPCIONAL	0						0,0
3	0,00,E+00	0,0%	OPCIONAL	0						0,0

*Nota.* Elaboración propia.

#### **4.4 Reporte del diseño**

Finalizado la verificación de las estructuras diseñadas, el diseñador podrá continuar a la interfaz de reporte la cual recopila los diseños empleados, sus respectivas verificaciones tanto por método empírico AASHTO93 y método racional, tablas de consumo, resumen de espesores y gráficas de las mismas. Esta interfaz se diseñó a modo de reporte con el fin de poder ser adjuntado en los informes que serán entregados a los clientes. En los anexos, se presenta el manual de usuario donde explica de manera más detallada, la forma en la que la macro ejecuta y recopila toda la información correspondiente.

## 5 Análisis

Durante la ejecución del proyecto, se presentaron algunas dificultades en la programación de macros, específicamente en la presentación de tablas con la información netamente necesaria, es decir, era necesario depurar la información de alternativas o capas de suelos que no se emplearán en el diseño con el fin de que estos no sean presentados en el reporte final. Al existir un enlace en cada una de las interfaces diseñadas por medio de los parámetros de entrada, al eliminar las columnas o filas en las cuales no se tienen valores ingresados, estas afectaban directamente las fórmulas que se encontraban vinculadas a las celdas eliminadas, generando errores de referencia en las fórmulas. Es por ello, que fue necesario la creación de hojas que contienen el formato inicial de cada una de las interfaces diseñadas, con las fórmulas y vínculos de cada una de las ecuaciones y procesos necesarios para el desarrollo de los resultados, a las cuales se encuentran vinculados los valores ingresados en las interfaces de diseño, con el fin de que esta internamente realice los cálculos necesarios y devuelva a la interfaz de diseño, las tablas de resultados con los datos y valores necesarios. Para lograr esto, se crearon macros que eliminan las tablas de las interfaces de diseño cada vez que se ejecutan las mismas y las reemplaza en su lugar por nuevas tablas proveniente de estas hojas de formatos que contienen todos los cálculos realizados, entregándolas en valores numéricos, es decir, conserva solo el valor del resultado y elimina las fórmulas o cálculos vinculados en las celdas. Estas macros a su vez, eliminan las filas y columnas que no se requieren y, al tenerse celdas con los resultados en valores numéricos, cuando estas celdas se eliminan, no afectarán en los resultados del resto de celdas. El inconveniente con este tipo de proceso, es que no se realiza de manera automática al momento que el diseñador ingresa los valores, si no que este deberá oprimir los botones que contienen las macros para que esta acción se realice.

Otra de las dificultades presentadas, fue en la creación de cuadros de dialogo que notifiquen al diseñador si los diseños cumplen o no con los parámetros ingresados, esto se debe a la forma en la que se ejecutaron las macros anteriormente descritas para la presentación de las tablas de resultados, las cuales impedían que las macros de dialogo reconociera los rangos de los parámetros de validación y los comparara con los valores de aceptación. Debido a esto, se optó por no hacer

uso de estos cuadros, lo cual obliga al diseñador hacer el análisis manual de comparar los resultados obtenidos con los valores de aceptación.

Se realizó la verificación del programador mediante la aplicación de un proyecto que requería el diseño de pavimento. Se ingresaron las condiciones particulares del proyecto, obtenidas de los ensayos de laboratorio y reconocimiento en campo de los suelos de subrasante, definiendo así, los espesores para cada capa de suelo empleada, de manera que garantizara el número estructural requerido. El programa respondió favorablemente al diseño establecido, desarrolló cada una de las interfaces en respuesta a las solicitudes requeridas y permitió el correcto análisis de diseño, sin embargo, se encontraron algunas deficiencias de forma respecto al diseño de las interfaces, las cuales, aunque no afectan en los resultados desarrollados los cuales se procesan correctamente, si afecta en la experiencia de manejo por parte del usuario. Estas falencias se deben a deficiencias en la continuidad y desplazamiento entre interfaces como la falta de botones que permitan devolverse a las interfaces anteriores o la posibilidad de modificar valores de diseño desde la interfaz en la que sea requerida, sin la necesidad de acudir a la interfaz específica que permite el ingreso del parámetro y al no contar con botones que faciliten el desplazamiento en estos casos, pueden generar confusiones en el diseñador al momento de desplazarse entre interfaces perdiendo así eficiencia y optimización en el uso. Otros de los errores percibidos se deben en los formatos de celdas de algunos valores al momento de ser reportados, es decir, algunos valores que deben ser presentados en valores porcentuales o en notación científica, se presentan de forma numérica. Estos formatos fueron corregidos en marcha permitiendo así el reporte de los valores en sus respectivas notaciones.

En términos generales, la programación cumple con los objetivos planteados, permiten el ingreso de datos, la realización de cálculos y la presentación de los resultados de las metodologías de diseño empleadas, además de entregar el reporte compilatorio del diseño el cual puede ser entregado en los informes y suministra cuadros de ayuda que permiten al diseñador en caso de dudas, elegir parámetros de diseño según las necesidades del pavimento a diseñar. Las interfaces de diseño se encuentran vinculadas de manera secuencial garantizando la continuidad del diseño durante todos sus procesos.

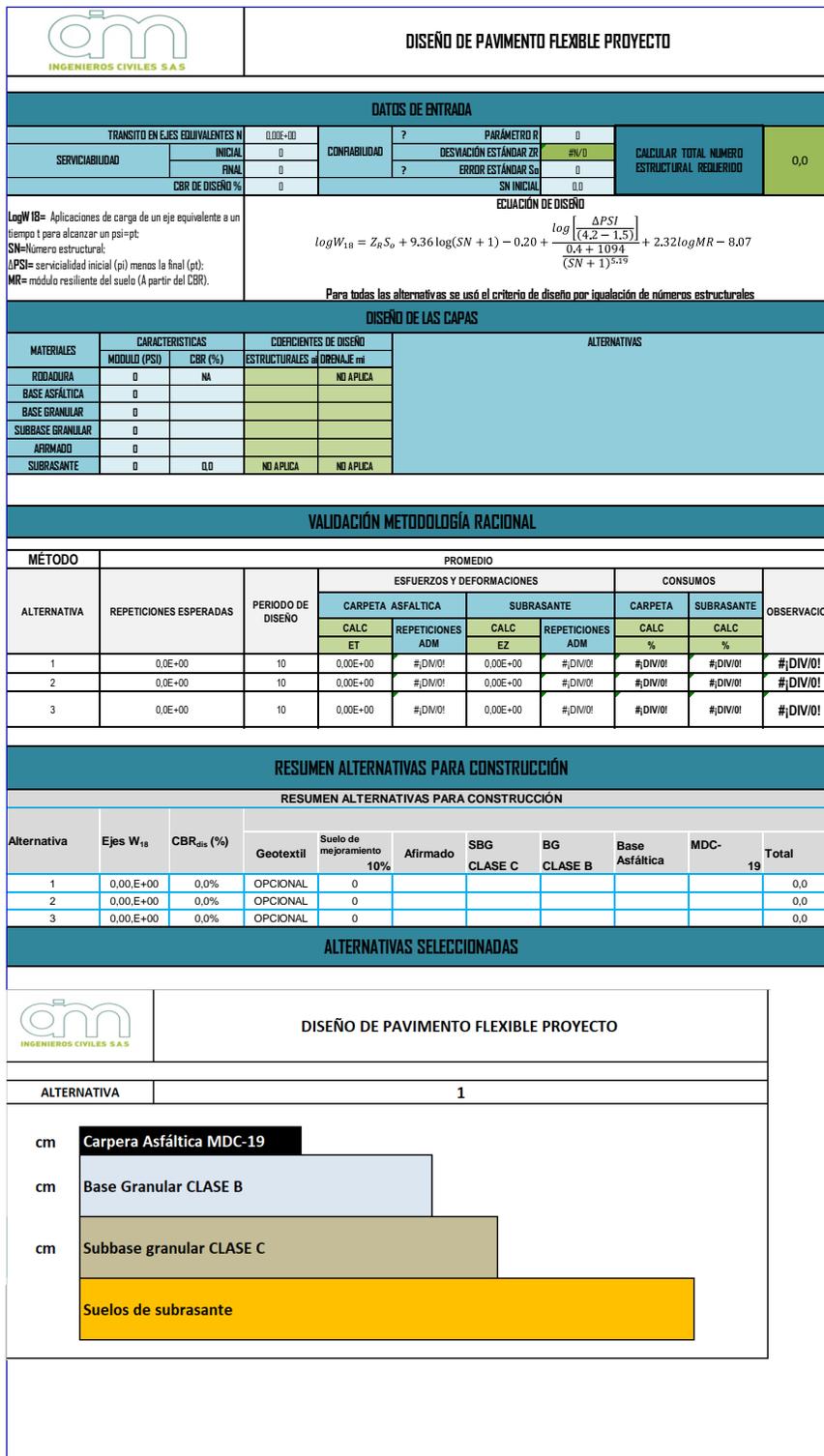
## 6 Conclusiones

Se presenta a la empresa AIM ingenieros civiles S.A.S, un programador de pavimentos por medio de interfaces de diseño realizadas en hojas de cálculo, las cuales desarrollan las ecuaciones de teorías mecanicistas para pavimentos de tipo flexible mencionadas en el marco teórico y atiende a las necesidades de la empresa en términos de optimización, organización de diseño y presentación de la misma. Este programador, realiza el cálculo del número estructural SN por medio del método AASTHO 93 y presenta los valores del SN efectivo y SN suministrado con el fin de que el diseñador pueda verificar si sus diseños cumplen o no con la metodología de diseño. También, presenta los modelos de falla establecidos para cada material que compone la estructura de pavimento y sirven de validación del diseño mediante los criterios de falla del instituto del asfalto (INA) y criterio La Shell, las cuales, suministran la información del tránsito admisible con el fin de ser comparado con el tránsito de diseño y así el diseñador puede validar sus diseños. Además, presenta las tablas resumen y gráficas de las alternativas diseñadas de manera automática.

Se tiene así, un programa que permite el diseño y análisis de pavimentos tipo flexibles, de una manera más fácil y eficiente, optimizando los tiempos de diseño y análisis, además de entregar un reporte compilatorio que puede ser entregado en los informes, mejorando la organización de estos.

En la **Figura 6** se presenta el modelo de reporte que se entregará en los informes y resume los procesos ejecutados en las interfaces de diseño del programador realizado y en la sección de Anexos, se presentan las macros realizadas las cuales permitieron el desarrollo del proyecto.

Figura 6  
Interfaz de resultados



Nota. Elaboración propia.

---

### **Referencias**

- AASHTO. (s.f.). AASHTO guide for design of pavement structures. Washington D.C.
- A.I.M. ingenieros civiles. (2022). Informe IP01-22. DISEÑO DE PAVIMENTO PARA EL PROYECTO PARQUE INDUSTRIAL HIPÓDROMO, MUNICIPIO DE GUARNE, ANTIOQUIA. Medellín.
- ASPHALT INSTITUTE. (1991). Thickness Design Asphalt Pavement for Highways and Streets. USA.
- USTROADS, (2012), Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design, Sydney, Australia
- Kandhal, P. S. & Cross, S. A. (1992). A National Study of Rutting in Hot Mix Asphalt (HMA) Pavements. En: NCAT Report 93 – 1, National Center of Asphalt Technology. 46 pp
- Coria G, C A; Hernández D, R I & Garnica A, P. (2018). Teorías para calcular esfuerzos, deformaciones y deflexiones en pavimentos flexibles: un enfoque mecanicista. Instituto Mexicano del transporte.
- INIVIAS. (2015). Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito. Bogotá D.C.
- López C, H. (2015). ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE DIFERENTES METODOLOGÍAS DE DISEÑO PARA ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO IMPLEMENTANDO LOS PARÁMETROS DE DISEÑO REQUERIDOS PARA EL CORREDOR MULALÓ – LOBOGUERRERO. Universidad Militar Nueva Granada.
- Rondón Q, H & Reyes L, F. (2007). METODOLOGÍAS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES: TENDENCIAS, ALCANCES Y LIMITACIONES. Universidad Militar Nueva Granada.
- Salamanca N, M & Zuluaga B, S. (2014). DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE POR MEDIO DE LOS MÉTODOS INVIAS, AASHTO 93 E INSTITUTO DEL ASFALTO PARA LA VÍA LA YE - SANTA LUCIA BARRANCA LEBRIJA ENTRE LOS ABSCISAS K19+250 A K25+750 UBICADA EN EL DEPARTAMENTO DEL CESAR. Universidad Católica de Colombia.
- SHELL LTD. (1978). SHELL Pavement Design Manual Asphalt Pavement And Overlays For Road Traffic Shell International Petroleum. London.

## **Anexos**

### **Anexo 1. Manual y guía de uso**

**#NOMBRE CORPORATIVO DE LA EMPRESA#**

(Logo corporativo)

**PROGRAMA DE DISEÑO Y ANÁLISIS DE PAVIMETOS TIPO FLEXIBLES**

**MANUAL DE USO**

**Elaborado por:**

**Jerónimo López Orrego**

**Practicante de pavimentos y auscultación de vías**

**Universidad de Antioquia**

**Medellín**

**2022**

LOGO CORPORATIVO	<b>MANUAL Y GUIA DE USO PROGRAMADOR DE PAVIMENTOS FLEXIBLES</b>
------------------	---

Este manual explica el funcionamiento del programa diseñado para la empresa #, para el diseño de pavimentos tipo flexible mediante el uso de procesos mecanicistas que permiten el análisis y validación de las estructuras de pavimento diseñadas. Esta consta de 4 interfaces de diseño realizadas en hojas de cálculo, las cuales, mediante el uso de fórmulas, comandos y macros, permiten al diseñador definir hasta tres alternativas de diseño para un proyecto específico y validar mediante métodos empíricos y racionales que las estructuras soporten las cargas de diseño definidas para su periodo de vida útil. Además de las 4 interfaces de diseño, se cuenta con otras dos interfaces que resumen las alternativas diseñadas y recopila los resultados de cada interfaz respectivamente. La finalidad de este programa es generar un reporte con el diseño y análisis de las estructuras solicitadas por las empresas o consorcios contratantes que puedan ser entregados en los informes de una manera organizada y eficiente, optimizando tiempos de elaboración de los mismos y facilitando a la empresa la realización de este tipo de diseño.

A continuación, se muestra cada una de las interfaces, explicando su funcionamiento, fórmulas y teorías empleadas, cabe destacar que cada una de las interfaces actúa de manera secuencial, es decir, el orden de estas representa el paso a paso a seguir en el diseño de pavimentos tipo flexible.

LOGO CORPORATIVO	<b>MANUAL Y GUIA DE USO PROGRAMADOR DE PAVIMENTOS FLEXIBLES</b>
------------------	---

## **1. Interfaz de entrada – Metodología empírica**

Esta interfaz permite el ingreso de los parámetros mecánicos de diseño, necesarios para establecer las capas y espesores de los materiales que conformarán la estructura de pavimento y realiza el primer análisis de diseño por medio de la metodología empírica la cual correlaciona el comportamiento de los pavimentos in situ, a través de observaciones y mediciones de campo, con los factores que causan los mecanismos de degradación en estas estructuras. Para este programa se emplea la metodología AASHTO 93 la cual identifica o encuentra un número estructural denominado en el contexto como “SN” que pueda soportar el nivel de carga solicitado. Para esto, se presenta la gráfica de la interfaz en la cual se enumera cada una de sus funciones de manera secuencial.

LOGO CORPORATIVO	<b>MANUAL Y GUIA DE USO PROGRAMADOR DE PAVIMENTOS FLEXIBLES</b>
------------------	---

Figura 1. Interfaz de entrada

LOGO CORPORATIVO	<b>DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE PROYECTO</b>				Numero de Alternativas a Diseñar (máximo 3)	NOMBRE DEL PROYECTO	
					<b>B</b>	<b>A</b>	
					AGREGAR		
					<b>C</b>	<b>C</b>	
<b>DATOS DE ENTRADA</b>							
TRANSITO EN EJES EQUIVALENTES N			?	PARÁMETRO R			
SERVICIABILIDAD	INICIAL	<b>D</b>	CONFIABILIDAD	DESVIACIÓN ESTÁNDAR ZR	#V/D	<b>F</b>	
	FINAL			ERROR ESTÁNDAR S <sub>o</sub>			
	CBR DE DISEÑO %			SN INICIAL			
					<b>E</b>	<b>I</b>	
<p>LogWIB= Aplicaciones de carga de un eje equivalente a un tiempo t para alcanzar un psi=pt:  SN=Número estructural:  ΔPSI= serviciabilidad inicial (pi) menos la final (pt):  MR= módulo resiliente del suelo (A partir del CBR).</p>		<p><b>ECUACIÓN DE DISEÑO</b></p> $\log W_{18} = Z_R S_o + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log \left[ \frac{\Delta PSI}{(4.2 - 1.5)} \right]}{0.4 + 1094 / (SN + 1)^{5.19}} + 2.32 \log MR - 8.07$ <p>Para todas las alternativas se usó el criterio de diseño por igualación de números estructurales</p>					
<b>DISEÑO DE LAS CAPAS</b>							
MATERIALES	CARACTERÍSTICAS		COEFICIENTES DE DISEÑO			ALTERNATIVAS	
	MÓDULO (PSI)	CBR (%)	ESTRUCTURALES a <sub>i</sub>	?	DRENAJE m <sub>i</sub>		?
RODADURA	0	NA			NO APLICA		
BASE ASFÁLTICA	0	NA					
BASE GRANULAR	0	<b>G</b>			<b>H</b>		<b>I</b>
SUBBASE GRANULAR	0						
AFIRMADO	0						
SUBRASANTE	0	0.0	NO APLICA		NO APLICA		
						<b>J</b>	

LOGO CORPORATIVO	<b>MANUAL Y GUIA DE USO PROGRAMADOR DE PAVIMENTOS FLEXIBLES</b>
------------------	---

#### **A. DATOS DE ENTRADA: Nombre del proyecto**

El diseñador ingresará el nombre del proyecto al cual realizará los diseños de pavimentos.

#### **B. DATOS DE ENTRADA: Número de alternativas a diseñar**

El diseñador podrá elegir entre una a tres alternativas de diseño para el proyecto. Para ello deberá escribir en el espacio en blanco el número de alternativas a realizar e inmediatamente dar sobre el botón “AGREGAR” la cual habilita una macro que entra en una hoja de formatos a buscar el formato correspondiente al número de alternativas ingresado y la pega en el espacio de alternativas (Sección I).

#### **C. DATOS DE ENTRADA: Módulo de resistencia de la mezcla o base asfáltica**

El diseñador debe ingresar los módulos de resistencia de la mezcla asfáltica y de la base asfáltica en caso de ser requerida. Estos módulos deben obtenerse previamente del diseño Marshall.

#### **D. DATOS DE ENTRADA**

En esta sección el diseñador deberá ingresar los parámetros mecánicos de diseño tales como tránsito de diseño, servicialidad y CBR de diseño.

#### **E. DATOS DE ENTRADA**

En esta sección, el diseñador debe ingresar los parámetros estadísticos R y error normal So. En este caso, el diseñador cuenta con dos botones en los que puede consultar las tablas relacionadas a estos parámetros, estos se pueden identificar con el símbolo de interrogación (?), los cuales, al hacer clic en ellos, desplegarán las tablas correspondientes. Las tablas aparecerán en cuadros de diálogos, diseñados a partir de las UserForms, encontrados en el programador Visual Basic de Excel, para esto, se crea la UserForm, se le asigna un nombre y se adjunta la tabla en formato JPEG, luego de esto, se crea una macro con un comando básico que permite mostrar la UserForm al momento de ejecutarse y por último, se ejecuta la macro por medio de la función asignar macro, la cual aparecerá al dar clic derecho

LOGO CORPORATIVO	<b>MANUAL Y GUIA DE USO PROGRAMADOR DE PAVIMENTOS FLEXIBLES</b>
------------------	---

sobre la figura que deseamos convertir en botón, una vez se asigne la macro a la figura, esta figura funcionará como botón el cual al momento de dar clic sobre este, desplegando así la tabla correspondiente.

Además de los parámetros mencionados anteriormente, en esta sección también se encuentra la desviación estándar, la cual depende del parámetro R y se generará automáticamente al momento de ingresar el valor R por medio de procesos internos que incluyen funciones que asocian los valores del parámetro al valor de desviación respectivo. A continuación, se presentan las tablas utilizadas para cada proceso.

Figura 2. Parámetro R.

Clasificación funcional	Nivel de confiabilidad recomendado	
	Urbana	Rural
Autopistas interestatales y otras	85 – 99.9	80 – 99.9
Arterias principales	80 – 99	75 – 95
Colectoras de tránsitos	80 – 95	75 – 95
Carreteras locales	50 – 80	50 – 80

Figura 3. Desviación estándar asociada al parámetro R ( $Z_R$ ) proceso interno.

**TABLA IV.5. Factores de Desviación Normal**

Confiabilidad	$Z_R$	Confiabilidad	$Z_R$
50	0	92	-1,405
60	-0,253	94	-1,555
70	-0,524	95	-1,645
75	-0,674	96	-1,751
80	-0,841	97	-1,881
85	-1,037	98	-2,054
90	-1,282	99	-2,327

Fuente: Guía para el Diseño y la Construcción de Pavimentos Rígidos  
Ing. Aurelio Salazar Rodríguez, 1998.

Figura 4. Error normal  $S_o$ .

En condición nueva	En sobrecapas
0.45	0.49

Por último, se deberá ingresar un valor inicial de SN (numero estructural) con el fin de iniciar el cálculo del SN requerido, pasando así a la siguiente sección.

LOGO CORPORATIVO	<b>MANUAL Y GUIA DE USO PROGRAMADOR DE PAVIMENTOS FLEXIBLES</b>
------------------	---

#### F. SECCIÓN DE CÁLCULO: Número estructural requerido

En esta sección, una vez Ingresado el valor del SN estructural, el diseñador deberá dar clic en el cuadro “CALCULAR TOTAL NUMERO ESTRUCTURAL REQUERIDO”, activando así una macro que contiene la ecuación de diseño presentada en la interfaz. Esta macro funciona de la siguiente manera: lee el valor del SN inicial ingresado y la vincula en la ecuación de diseño, encontrando un valor inicial de LogN, con este valor, la función vuelve a recalcularse el valor de SN despejándola de la misma ecuación, encontrando así un nuevo valor de SN el cual volverá a ingresarse y calcularse dentro de la ecuación, generando así un proceso iterativo el cual se detiene cuando los valores de SN comienzan a igualarse hasta llegar a un margen porcentual establecido de 0.000001. Una vez realizado el proceso, la macro devolverá el valor real en las casillas de SN inicial y la celda de color verde que se encuentra al lado del cuadro de cálculo.

A partir del SN calculado, el diseñador podrá comenzar a definir su estructura de pavimento, continuando con la siguiente sección.

#### G. DATOS DE ENTRADA Y CÁLCULO: Características de los materiales.

En esta sección el diseñador deberá ingresar los valores de CBR de las capas que empleará en su diseño a excepción de la carpeta asfáltica y base asfáltica las cuales no aplican y el CBR de la subrasante corresponde al CBR de diseño y se genera automáticamente. Una vez definidos los valores de CBR, el programa calcula automáticamente los módulos de cada capa empleando la siguiente ecuación propuesta por el método AASHTO:

$$MR_{ste} = 2555 * CBR^{0.64}$$

Fuente: AASHTO, “AASHTO guide for design of pavement structures”, Washington D.C.

Donde:

CBR=resistencia de diseño de la subrasante en %

MR<sub>ste</sub>= módulo resiliente de la subrasante [PSI].

Estos valores aparecerán automáticamente en la columna de “MODULO EN PSI”, por esto es importante que el diseñador no ingrese ningún tipo de valor en estas celdas ya que se encuentran programadas y se dañarían.

**H. DATOS DE ENTRADA: coeficientes de aporte**

En esta sección el diseñador podrá ingresar los coeficientes de aporte estructural  $a_i$ , el cual corresponde a la relación entre el SN y el espesor del pavimento, y el coeficiente de drenaje  $m_i$ , que corresponde al porcentaje del tiempo en que la estructura esta expuesto a niveles de agua cercanos a la saturación. Para ello, también cuenta con las tablas de referencia que se presentan a continuación y funcionan de la misma manera que las descritas en la sección E.

Figura 5. Coeficiente de aporte estructural  $a_i$

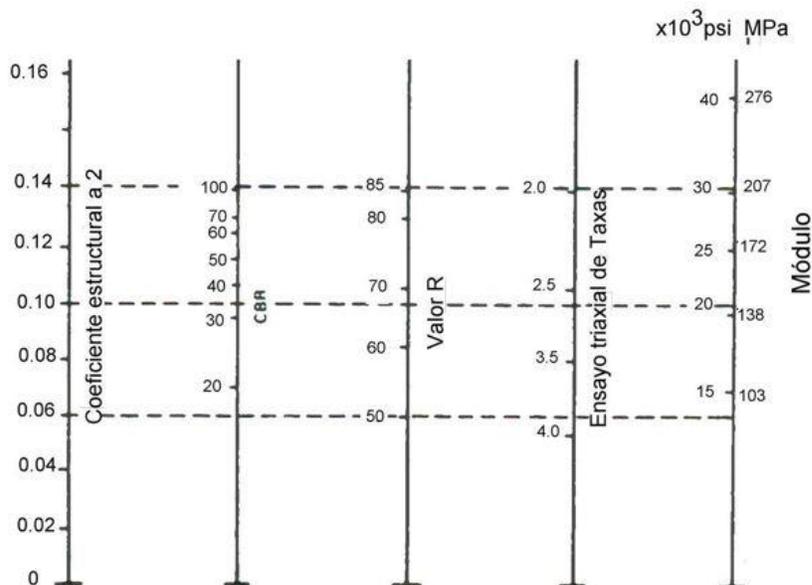


Figura 6. Coeficiente de drenaje  $m_i$

Capacidad de Drenaje	% de tiempo en el que el pavimento está expuesto a niveles de humedad próximos a la saturación.			
	Menos del 1 %	1.a 5 %	5.a 25 %	Más del 25 %
Excelente	1,40 – 1,35	1,35 – 1,30	1,30 – 1,20	1,20
Bueno	1,35 – 1,25	1,25 – 1,15	1,15 – 1,00	1,00
Regular	1,25 – 1,15	1,15 – 1,05	1,00 – 0,80	0,80
Malo	1,15 – 1,05	1,05 – 0,80	0,80 – 0,60	0,60
Muy malo	1,05 – 0,95	0,95 – 0,75	0,75 – 0,40	0,40

LOGO CORPORATIVO	<b>MANUAL Y GUIA DE USO PROGRAMADOR DE PAVIMENTOS FLEXIBLES</b>
------------------	---

Debe tenerse en cuenta que ambos coeficientes no aplican para la subrasante y el coeficiente de drenaje tampoco aplica para la carpeta asfáltica.

I. DATOS DE ENTRADA Y CÁLCULO: Espesor de las capas del pavimento y cálculo del SN suministrado.

Cuando el Diseñador oprime del botón de “AGREGAR”, automáticamente se generan las tablas de diseño según el número de alternativas ingresado, teniendo así las siguientes opciones:

Figura 7. 1 alternativa

ALTERNATIVA 1	
ESPEJOR cm	Sni (estimado)
	0,00
	0,00
	0,00
	0,00
	0,00
	0,00
SN suministrado	0,00

Figura 8. 2 alternativas

ALTERNATIVA 1		ALTERNATIVA 2	
ESPEJOR cm	Sni (estimado)	ESPEJOR cm	Sni (estimado)
	0,00		0,00
	0,00		0,00
	0,00		0,00
	0,00		0,00
	0,00		0,00
	0,00		0,00
SN suministrado	0,00	SN suministrado	0,00

Figura 9. 3 alternativas

ALTERNATIVA 1		ALTERNATIVA 2		ALTERNATIVA 3	
ESPEJOR cm	Sni (estimado)	ESPEJOR cm	Sni (estimado)	ESPEJOR cm	Sni (estimado)
	0,00		0,00		0,00
	0,00		0,00		0,00
	0,00		0,00		0,00
	0,00		0,00		0,00
	0,00		0,00		0,00
	0,00		0,00		0,00
SN suministrado	0,00	SN suministrado	0,00	SN suministrado	0,00

LOGO CORPORATIVO	<p style="text-align: center;"><b>MANUAL Y GUIA DE USO PROGRAMADOR DE PAVIMENTOS FLEXIBLES</b></p>
------------------	--

Según sea el caso, el diseñador ingresará en los espacios en blanco (columnas “ESPESOR cm” de color azul claro) los espesores de cada capa a emplear en el diseño y automáticamente el programa calculará el número estructural asociado a cada una de estas capas por medio de la siguiente ecuación:

$$Sni = \left(\frac{hi}{2,54}\right) \times a_i \times m_i$$

Donde Sni es el número estructural de la capa, hi el espesor de la capa, ai y mi los coeficientes de aporte estructural y drenaje.

Cuando el programa calcula cada uno de los Sni de las capas correspondientes, procede a sumar cada una de estas por alternativa obteniendo así, el número estructural suministrado por la estructura de pavimento diseñada. Siempre deberá verificarse que este valor de SN sea igual o mayor al SN calculado anteriormente en la sección F para validar los diseños realizados por este método, en caso de que el valor de SN suministrado sea menor, deberá aumentarse los espesores de las capas hasta que este criterio se cumpla.

Una vez comparados los valores de SN suministrado y SN requeridos se puede dar por válida la metodología empleada, continuando así a la siguiente metodología de diseño la cual es la metodología racional y valida las estructuras mediante los esfuerzos que se producen tanto en la capa de rodadura como en la subrasante. Para ello se debe dar clic sobre el cuadro de “CONTINUAR” (Sección J), el cual habilita una macro que permite pasar a la siguiente interfaz de diseño.

## **2. INTERFAZ MODELO ESTRUCTURAL**

Esta interfaz, como su nombre lo indica, muestra las propiedades de cada una de las capas que conforman las alternativas de diseño realizadas (espesores, módulos y valores de Poisson), con el fin de que el diseñador pueda ingresar estos valores en los programas de cálculos de esfuerzos y deformaciones tales como el DEPAV, PITRAPAVE, entre otros. Para esto, el diseñador deberá ingresar, primeramente, los valores de Poisson para cada una de las capas, las cuales por lo general y como recomendación, se utilizan los siguientes valores: 0.35 para carpeta asfáltica, 0.4 para capas intermedias y 0.5 para subrasante. A continuación, se presenta la Interfaz diseñada.

Figura 10. Interfaz modelo estructural

VALORES DE POISSON DE LAS CAPAS		COMPLETAR MODELO ESTRUCTURAL	
RODADURA	μ	VER MODELO ESTRUCTURAL	
BASE ASFÁLTICA	μ	CONTINUAR	
BASE GRANULAR	μ		
SUBBASE GRANULAR	μ		
AFIRMADO	μ		
SUBRASANTE	μ		

DATOS DE INGRESO AL PROGRAMA DE CÁLCULOS DE ESFUERZOS												
MATERIAL		EN Kg/cm2				EN Pa				EN PSI		
		Alt 1	Alt 2	Alt 3		Alt 1	Alt 2	Alt 3		Alt 1	Alt 2	Alt 3
RODADURA	E (Kg/cm2)	#jREF!	#jREF!	#jREF!	E (Kg/cm2)	#jREF!	#jREF!	#jREF!	E (Kg/cm2)	#jREF!	#jREF!	#jREF!
	μ	0	0	0	μ	0	0	0	μ	0	0	0
BASE ASFÁLTICA	espesor (cm)	0,00	0,00	0,00	espesor (cm)	0,00	0,00	0,00	espesor (cm)	0,00	0,00	0,00
	E (Kg/cm2)	0	0	0		0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00		0,00	0,00	0,00
BASE GRANULAR	μ	0	0	0	μ	0	0	0	μ	0	0	0
	espesor (cm)	0,0	0,0	0,0	espesor (cm)	0,00	0,00	0,00	espesor (cm)	0,00	0,00	0,00
SUBBASE GRANULAR	E (Kg/cm2)	0	0	0	E (Kg/cm2)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	E (Kg/cm2)	0,00	0,00	0,00
	μ	0	0	0	μ	0	0	0	μ	0	0	0
AFIRMADO	espesor (cm)	0,0	0,0	0,0	espesor (cm)	0,00	0,00	0,00	espesor (cm)	0,00	0,00	0,00
	E (Kg/cm2)	0	0	0	E (Kg/cm2)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	E (Kg/cm2)	0,00	0,00	0,00
SUBRASANTE	μ	#jREF!	#jREF!	#jREF!	μ	#jREF!	#jREF!	#jREF!	μ	#jREF!	#jREF!	#jREF!
	espesor (cm)	#jREF!	#jREF!	#jREF!	espesor (cm)	#jREF!	#jREF!	#jREF!	espesor (cm)	#jREF!	#jREF!	#jREF!
SUBRASANTE	E (Kg/cm2)	#jREF!	#jREF!	#jREF!	E (Kg/cm2)	#jREF!	#jREF!	#jREF!	E (Kg/cm2)	#jREF!	#jREF!	#jREF!
	μ	#jREF!	#jREF!	#jREF!	μ	#jREF!	#jREF!	#jREF!	μ	#jREF!	#jREF!	#jREF!

El funcionamiento de esta interfaz es mas sencilla, una vez ingresados los valores de Poisson, se debe dar clic en el cuadro de “COMPLETAR MODELO ESTRUCTURAL”, este activará una macro que ingresará a la tabla de la modelo estructural encontrada en una hoja de formatos, los valores de Poisson y devolverá a la interfaz la misma tabla con todos los valores en tres unidades diferentes (Kg/cm2, Pascales y PSI) con el fin de facilitar el ingreso de estos datos a los programas de cálculos de esfuerzos. Para el funcionamiento de esta macro, es necesario que esta elimine la tabla que se encuentre actualmente en la interfaz, con el fin de pegar la tabla definitiva con todos los valores. Esta tabla es copiada desde la hoja de formatos, la cual recopila toda la información ingresada en la interfaz, espesores, valores de Poisson, módulos de la carpeta asfáltica, base asfáltica y subrasante. En cuanto a los módulos de las capas granulares, se calculan con el modelo de Barker, Brabston & Chou, partiendo del módulo de resiliencia de la capa de apoyo y de los espesores de cada capa según el modelo proyectado.

LOGO CORPORATIVO	<b>MANUAL Y GUIA DE USO PROGRAMADOR DE PAVIMENTOS FLEXIBLES</b>
------------------	---

$$E_{(n)} = E_{(n-1)} \left\{ \begin{array}{l} A \cdot \log_{10}[h_{(n)}] + B \cdot \log_{10}[E_{(n-1)}] \\ -C \cdot \log_{10}[h_{(n)}] \cdot \log_{10}[E_{(n-1)}] - D \end{array} \right\}$$

**Subbase granular. A = 5.35 B = 0.62 C = 1.56 D = 1.13.**

**Base granular. A = 8.05 B = 0.84 C = 2.10 D = 2.21.**

Donde:

En= módulo de la capa superior sobre la que se quiere estimar el módulo elástico

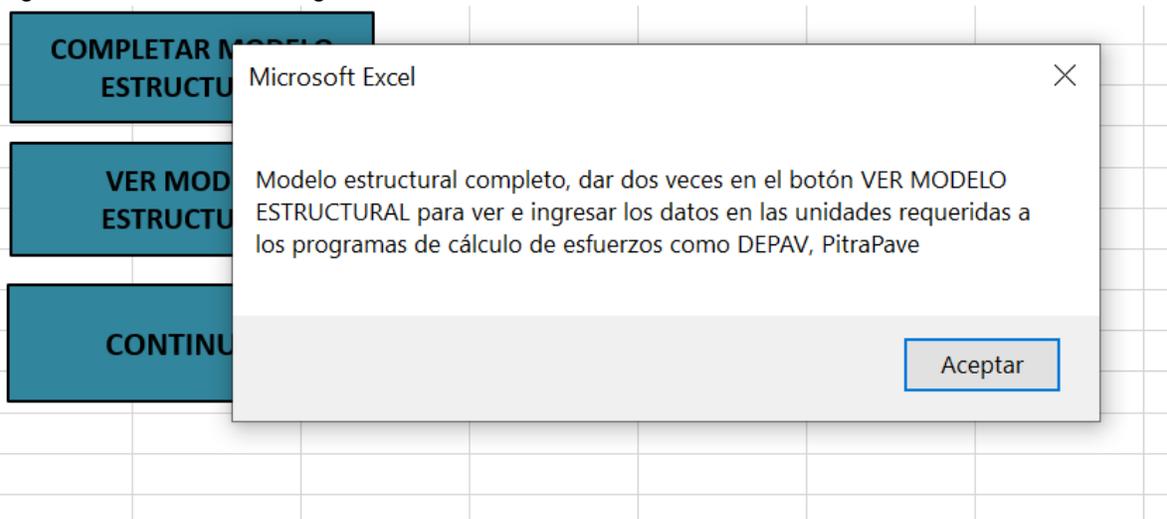
$\left[ \frac{Kg}{cm^2} \right]$

hn= espesor de la capa superior [cm]

En-1= módulo de la capa inferior sobre la que se conoce el módulo elástico  $\left[ \frac{Kg}{cm^2} \right]$

Continuando, una vez la macro se ejecuta, aparecerá un cuadro de dialogo el cual confirmará el proceso realizado y notificará que deberá oprimir dos veces el cuadro de “VER MODELO ESTRUCTURAL” con el fin de depurar todos los datos vacíos de las capas y alternativas que no serán utilizadas. Este cuadro de dialogo se crea a partir del comando MsgBox.

Figura 11. Cuadro de dialogo



Este cuadro como se mencionó, activará la macro que depurará la información que no se necesita, dejando así los datos de las capas a emplear para cada alternativa diseñada. La macro parte desde el concepto de que se tienen 3 alternativas de diseño con todas las capas posibles. Pero, como en la primer interfaz se estableció el número de alternativas a realizar y solo se completó la información de las capas a emplear, el formato de la tabla del modelo estructural recopilará todos estos

LOGO CORPORATIVO	<b>MANUAL Y GUIA DE USO PROGRAMADOR DE PAVIMENTOS FLEXIBLES</b>
------------------	---

valores y considerará los valores de las capas y alternativas que no se utilizaron como cero o dejará estas celdas vacías y así las entregará a la interfaz, teniendo así, la necesidad de eliminar estos datos. Es por eso que la macro entra en la tabla pegada en la interfaz a leer los valores de carpeta asfáltica que sean cero o en su defecto, las celdas se encuentren vacías. Una vez identifica estos valores procede a seleccionar toda la información de esas capas y alternativas y las elimina, dejando así, solamente las alternativas y capas que serán empleadas en el diseño y serán ingresadas en los programas de cálculo de esfuerzos. La razón por la que el cuadro debe oprimirse dos veces es porque la macro necesita volver a ejecutarse para poder eliminar por completo estos valores.

Una vez completado el proceso anterior, el diseñador deberá emplear el programa de preferencia para calcular los esfuerzos en la carpeta asfáltica (esfuerzos cortantes) y en la subrasante (esfuerzos de compresión), una vez obtenidos estos valores, podrá continuar a la siguiente interfaz oprimiendo el cuadro de "CONTINUAR"

### **3. INTERFAZ DE VALIDACIÓN- Método Racional.**

Los resultados obtenidos en el método AASTHO 93, pueden ser comparados con leyes de fatiga con el fin de asociar los esfuerzos y deformaciones con el tráfico que puede soportar la estructura de pavimento durante su vida útil. Esta interfaz, permite el ingreso de los esfuerzos calculados en los programas específicos para esta función, y analiza, mediante dos modelos de falla el tránsito admisible para las estructuras diseñadas y lo compara con el tránsito de diseño. Los criterios de falla con los que trabaja el programa son los criterios propuestos por el instituto de asfalto (INA) y criterio de la Shell.

LOGO CORPORATIVO	<b>MANUAL Y GUIA DE USO PROGRAMADOR DE PAVIMENTOS FLEXIBLES</b>
------------------	---

Figura 12. Interfaz de validación

VERIFICACIÓN DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES			
	ALT 1	ALT 2	ALT 3
INGRESA EL ESFUERZO EN LA CARPETA ASFÁLTICA (ET)			
INGRESA EL ESFUERZO EN LA SUBRASANTE (EZ)			
SUELO DE MEJORAMIENTO (cm)	0	0	0
CARACTERISITICAS DE MEZCLA SHELL		CARACTERISITICAS DE MEZCLA INA	
Vb ?	11.48	Vb ?	12
E (Mpa)	0	Va ?	4.2
E (Kg/cm2)	0	E (EN PSI)	0
E (EN N/m2)	0.E+00	E (EN Kg/cm2)	0
K ?	1.5	K	18.4
C	No aplica	C	1.81002755
SELECCIONA EL MÉTODO DE VALIDACIÓN	PROMEDIO		

**VALIDAR**

**CONTINUAR**

En esta interfaz, el usuario deberá ingresar en las casillas en blanco, el valor de los esfuerzos en la carpeta asfáltica y en la subrasante calculados para cada una de las alternativas diseñadas. Además, el programa solicitará los espesores de los suelos de mejoramiento:

Atención: El suelo de mejoramiento depende exclusivamente de los criterios establecidos para los CBR de diseño, es decir, el diseñador debe definir previamente al diseño si el valor del CBR se obtiene netamente de las propiedades de resistencia de los suelos de subrasante o si estos necesitan de una plataforma de trabajo que mejore tales condiciones, asignando así, Un CBR equivalente que depende del espesor y CBR de los suelos empleados para este tipo de plataformas, los cuales vienen especificados por normativa. Por lo general, los espesores se utilizan de la siguiente manera: 30 cm cuando se emplean suelos de mejoramiento con CBR mayores al 10% o 20cm cuando los CBR son mayores al 15%

Según sea el caso, el diseñador podrá elegir el espesor requerido para el diseño mediante una lista desplegable donde podrá escoger los espesores anteriormente descritos. En caso de no emplear este tipo de suelo, deberá escoger el valor 0.

LOGO CORPORATIVO	<b>MANUAL Y GUIA DE USO PROGRAMADOR DE PAVIMENTOS FLEXIBLES</b>
------------------	---

Figura 13. Espesores suelos de mejoramiento

VERIFICACIÓN DE ESFUERZOS Y DEFO		
	ALT 1	ALT 2
INGRESA EL ESFUERZO EN LA CARPETA ASFÁLTICA (ET)		
INGRESA EL ESFUERZO EN LA SUBRASANTE (EZ)		
SUELO DE MEJORAMIENTO (cm)	0	0
CARACTERISITICAS	0 20 30	ARACTER
Vb		
E (Mpa)	0	Va
E (Kg/cm2)	0	E (EN PSI)

Continuando con la interfaz, los modelos de falla requieren de las características propias de la mezcla asfáltica, las cuales se obtienen a partir de los diseños Marshall y de unos factores de ajuste o calage (K).

Las ecuaciones que cada uno de los modelos utiliza son los siguientes:

- *Fórmula INA (Instituto Norteamericano del Asfalto) carpeta asfáltica.*

$$Nf = 0.00432 * K * C * Emix^{-0.854} * \epsilon_{r1}^{-3.291}$$

Dónde:

$$C = 10^M$$

$$M = 4.84 * \left[ \frac{Vb}{Va + Vb} - 0.6875 \right]$$

Vb= porcentaje de volumen de asfalto en la mezcla

Va= porcentaje de vacíos con aire en la mezcla asfáltica

K= factor de calage = 18.4

Emix= módulo de la mezcla asfáltica en PSI

$\epsilon_{r1}$  = Deformación máxima de tracción calculada en la cara inferior de la capa

- *Fórmula INA (Instituto Norteamericano del Asfalto) subrasante.*

$$Nf = 1.365 * 10^{-9} \epsilon_z^{-4.477}$$

Donde:

$\epsilon_z$ : Deformación de compresión en la cara superior de la subrasante

Nf: Número acumulado de ejes equivalentes de 8.2 ton en el carril de diseño durante el período de diseño y a partir del año de puesta en servicio

LOGO CORPORATIVO	<b>MANUAL Y GUIA DE USO PROGRAMADOR DE PAVIMENTOS FLEXIBLES</b>
------------------	---

El modelo de agrietamiento por fatiga propuesto por el método SHELL, se emplea la fórmula propuesta por Jameson en la preparación de la Guía Austroads en el año 2004, en la cual asignan un factor de confiabilidad "Reliability Factor", la cual es una función de transferencia que relaciona la vida media de fatiga en laboratorio (Shell, 1978) con la vida de fatiga en servicio predicha, usando en esta parte la confiabilidad deseada del proyecto. (Austroads, 2012)

- *Fórmula Shell (modificada por Jameson año 2001) carpeta asfáltica.*

$$Nf = K \left[ \frac{6918(0.856Vb + 1.08)}{Emix^{0.36} \varepsilon_{r1}} \right]^5$$

Dónde:

Vb= porcentaje de volumen de asfalto en la mezcla

K= factor de calage (a partir del factor de confiabilidad)

Emix= módulo de la mezcla asfáltica en Mpa

$\varepsilon_{r1}$  = Deformación máxima de tracción calculada en la cara inferior de la capa

Los factores de calage para el criterio de la Shell, se definen a partir de diferentes porcentajes de confianza las cuales serán definidas por el diseñador y se presentan a continuación:

Figura 14. Factores de seguridad.

**2004 Guide Suggested Reliability Factors (RF)  
for Asphalt Fatigue**

Desired Project Reliability				
80%	85%	90%	95%	97.5%
2.5	2.0	1.5	1.0	0.67

Fuente: Technical Basis Of Austroads Pavement Design Guide, 2004

Esta tabla podrá ser consultada por el diseñador haciendo clic en el símbolo de interrogación (?) ubicado al lado del parámetro K para el criterio Shell.

- *Fórmula Shell subrasante.*

$$\varepsilon_{z adm} = 2.13 \times 10^{-2} * N^{-0.25}$$

Donde:

LOGO CORPORATIVO	<b>MANUAL Y GUIA DE USO PROGRAMADOR DE PAVIMENTOS FLEXIBLES</b>
------------------	---

$\epsilon_{z adm}$ : deformación unitaria admisible por compresión en la parte superior de la subrasante en mm/mm.

**N**: número total de ejes sencillos equivalentes acumulados de 8.2 ton en el carril de diseño y durante el período de diseño.

Nota: Se debe tener presente, que los únicos valores que el diseñador debe ingresar son los siguientes:

- Para Criterio Shell
  - Porcentaje de volumen de asfalto Vb
  - Factor de calage K
  
- Para Criterio INA
  - Porcentaje de volumen de asfalto Vb
  - Porcentaje de vacíos con aire en la mezcla Va

De resto, los demás factores se agregan por defecto. El programa, además, recomienda unos valores de Vb y Va los cuales, son el promedio de n diferentes mezclas realizadas en Colombia y que, por lo general, rondan en estos valores.

Es importante aclarar que, solamente es necesario ingresar los valores para el criterio con el que el diseñador requiera validar los esfuerzos. El criterio lo podrá escoger dentro de la lista desplegable encontrada en la celda al lado del cuadro "SELECCIONA EL MÉTODO DE VALIDACIÓN" en el cual se enlistan tres opciones:

- Criterio INA
- Criterio la Shell
- Promedio de ambos criterios

Figura 15. Criterios de falla a elegir

CARACTERISITICAS DE MEZCLA SHELL		CARACTERISITICAS DE MEZCLA INA	
Vb	?	Vb	?
E (Mpa)	0	Va	?
E (Kg/cm2)	0	E (EN PSI)	0
E (EN N/m2)	0,E+00	E (EN Kg/cm2)	0
K	?	K	18,4
C	#,DIV/0!	C	#,DIV/0!
SELECCIONA EL MÉTODO DE VALIDACIÓN	PROMEDIO		
	INA SHELL PROMEDIO		

LOGO CORPORATIVO	<b>MANUAL Y GUIA DE USO PROGRAMADOR DE PAVIMENTOS FLEXIBLES</b>
------------------	---

Una vez el diseñador defina el criterio y haya ingresado los datos correspondientes, deberá oprimir el cuadro de "VALIDAR" y se ejecutará una macro que entra en las hojas de formatos a buscar la tabla de análisis para el criterio establecido la cual recopila toda la información necesaria para realizar internamente las ecuaciones descritas. Para validar los modelos, las tablas comparan los esfuerzos admisibles de las capas de rodadura y subrasante y las compara con el tránsito el diseño estableciendo un porcentaje de consumo de cada estructura. Si estos consumos son inferiores al 100%, significa que la estructura soportará el tránsito con el que fue diseñado y aparecerá una celda con el texto "OK" el cual, valida la estructura correspondiente, por el contrario, si estos consumos son mayores al 100%, aparecerá el texto "NO OK" el cual rechaza el diseño en vista de que no soportaría el tránsito de diseño asignado. Se debe tener presente que, para que la estructura sea válida los consumos tanto de la capa de rodadura como de subrasante deben ser inferiores al 100%.

Una vez la macro realice el procedimiento anterior, pegará en la interfaz, la tabla con la respectiva información descrita y el diseñador podrá observar cuales alternativas cumplen o no y continuar con el cuadro resumen haciendo clic en el cuadro de "CONTINUAR".

Las tablas que la interfaz mostrará según el criterio establecido son las siguientes:

LOGO CORPORATIVO	<b>MANUAL Y GUIA DE USO PROGRAMADOR DE PAVIMENTOS FLEXIBLES</b>
------------------	---

Figura 16. Tabla para criterio INA

ALTERNATIVA	ESPEORES CM							REPETICIONES ESPERADAS	PERIODO DE DISEÑO	ALTERNATIVA	ESFUERZOS Y DEFORMACIONES				CONSUMOS		OBSERVACION
	RODADURA	BASE ASFÁLTICA	BASE	SUBBASE	AFIRMADO	SUELO DE MEJORAMIENTO	TOTAL				CARPETA ASFÁLTICA		SUBRASANTE		CARPETA	SUBRASANTE	
											CALC	REPETICIONES	CALC	REPETICIONES	CALC	CALC	
											ET	ADM	EZ	ADM	%	%	
1						0.0	0.0	0.00E+00	10	1	0.00E+00	#DIV/0!	0.00E+00	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	OK/NO OK
2						0.0	0.0	0.00E+00	10	2	0.00E+00	#DIV/0!	0.00E+00	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	OK/NO OK
3						0.0	0.0	0.00E+00	10	3	0.00E+00	#DIV/0!	0.00E+00	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	OK/NO OK

Figura 17. Tabla para criterio Shell

ALTERNATIVA	ESPEORES CM							REPETICIONES ESPERADAS	PERIODO DE DISEÑO	ALTERNATIVA	ESFUERZOS Y DEFORMACIONES				CONSUMOS		OBSERVACION
	RODADURA	BASE ASFÁLTICA	BASE	SUBBASE	AFIRMADO	SUELO DE MEJORAMIENTO	TOTAL				RODADURA		SUBRASANTE		RODADURA	SUBRASANTE	
											CALC	REPETICIONES	CALC	REPETICIONES	CALC	CALC	
											ET	ADM	EZ	ADM	%	%	
1						0.0	0.0	0.0E+00	10	1	0.00E+00	#DIV/0!	0.00E+00	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	OK/NO OK
2						0.0	0.0	0.0E+00	10	2	0.00E+00	#DIV/0!	0.00E+00	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	OK/NO OK
3						0.0	0.0	0.0E+00	10	3	0.00E+00	#DIV/0!	0.00E+00	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	OK/NO OK

Figura 18. Tabla promedio de ambas

ALTERNATIVA	ESPEORES CM							REPETICIONES ESPERADAS	PERIODO DE DISEÑO	ALTERNATIVA	INA				SHELL				PROMEDIO		OBSERVACION
	RODADURA	BASE ASFÁLTICA	BASE	SUBBASE	AFIRMADO	SUELO DE MEJORAMIENTO	TOTAL				ESFUERZOS Y DEFORMACIONES				ESFUERZOS Y DEFORMACIONES				RODADURA	SUBRASANTE	
											RODADURA		SUBRASANTE		RODADURA		SUBRASANTE		RODADURA	SUBRASANTE	
											CALC	REPETICIONES	CALC	REPETICIONES	CALC	REPETICIONES	CALC	REPETICIONES	REPETICIONES	REPETICIONES	
											ET	ADM	EZ	ADM	ET	ADM	EZ	ADM	ADM	ADM	
1						0.0	0.0	0.0E+00	10	1	0.00E+00	#DIV/0!	0.00E+00	#DIV/0!	0.00E+00	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	OK/NO OK
2						0.0	0.0	0.0E+00	10	2	0.00E+00	#DIV/0!	0.00E+00	#DIV/0!	0.00E+00	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	OK/NO OK
3						0.0	0.0	0.0E+00	10	3	0.00E+00	#DIV/0!	0.00E+00	#DIV/0!	0.00E+00	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	OK/NO OK

#### 4. Interfaz de verificación

Esta interfaz, presenta una tabla editable con el resumen de las especificaciones de las estructuras de pavimentos. En esta interfaz, el diseñador podrá verificar nuevamente que los espesores de cada una de las alternativas de diseño correspondan a las ingresadas, además de los parámetros de tránsito y CBR de diseño. Por último, para terminar de completar las especificaciones de las capas de suelo, el diseñador podrá elegir la clase de base y subbase granular y el tipo de mezcla asfáltica, las cuales se establecen en las especificaciones técnicas del INVIAS y dependen del tipo de vía a pavimentar y las condiciones climáticas de la región. Por último, el diseñador tendrá la opción de incluir o no el uso de geotextiles de separación los cuales ayudan a mejorar la resistencia del pavimento.

Figura 19. Interfaz de verificación

RESUMEN ALTERNATIVAS PARA CONSTRUCCIÓN										
Alternativa	Ejes W <sub>18</sub>	CBR <sub>dis</sub> (%)	Geotextil	Suelo de mejoramiento 10%	Afirmado	SBG CLASE C	BG CLASE B	Base Asfáltica	MDC-19	Total
1	0,00,E+00	0,0%	OPCIONAL	0						0,0
2	0,00,E+00	0,0%	OPCIONAL	0						0,0
3	0,00,E+00	0,0%	OPCIONAL	0						0,0

**VER RESUMEN**

Figura 20. selección de datos

The screenshot shows the 'RESUMEN ALTERNATIVAS PARA CONSTRUCCIÓN' table with several dropdown menus open for data selection:

- Geotextil:** A dropdown menu is open showing options: OPCIONAL, SI, NO, OPCIONAL.
- SBG:** A dropdown menu is open showing options: CLASE A, CLASE B, CLASE C.
- MDC-19:** A dropdown menu is open showing options: 10, 19, 25.

The table data is as follows:

Alternativa	Ejes W <sub>18</sub>	CBR <sub>dis</sub> (%)	Geotextil	Suelo de mejoramiento 10%	Afirmado	SBG CLASE C	BG CLASE B	Base Asfáltica	MDC-19	Total
1	0,00,E+00	0,0%	OPCIONAL	0						0,0
2	0,00,E+00	0,0%	OPCIONAL	0						0,0
3	0,00,E+00	0,0%	OPCIONAL	0						0,0

LOGO CORPORATIVO	<b>MANUAL Y GUIA DE USO PROGRAMADOR DE PAVIMENTOS FLEXIBLES</b>
------------------	---

Nota: Al igual que la tabla de consumos de la interfaz de validación, esta tabla contiene la información de todas las alternativas y capas de suelo posibles a diseñar, por esto es importante, que el diseñador verifique que las alternativas y capas que no empleó, se encuentren vacías o en cero, con el fin de que las macros puedan depurarlas. Verificados los diseños, se podrá continuar a la interfaz de resumen, la cual presenta la misma tabla pero con la posibilidad de depurar la información no necesaria.

## 5. INTERFAZ RESUMEN

Esta interfaz, presenta la misma tabla anterior pero ya editada, con tres botones los cuales permiten borrar las alternativas (cuadro “BORRAR ALT”) y capas de suelo sin información (cuadro “DEPURAR”), además del botón que permite ver el reporte del diseño realizado (cuadro “VER REPORTE”). Estos botones, ejecutan las macros que depuran la información no necesaria del mismo modo que las descritas anteriormente, dejando así, las alternativas con sus respectivas capas diseñadas y permitiendo continuar a la interfaz de reporte.

Figura 21. Interfaz resumen

<b>BORRAR ALT.</b>		<b>DEPURAR</b>		<b>VER REPORTE</b>						
RESUMEN ALTERNATIVAS PARA CONSTRUCCIÓN										
Alternativa	Ejes W <sub>18</sub>	CBR <sub>dis</sub> (%)								
			Geotextil	Suelo de mejoramiento 10%	Afirmado	SBG CLASE C	BG CLASE B	Base Asfáltica	MDC-19	Total
1	0,00,E+00	0,0%	OPCIONAL	0						0,0
2	0,00,E+00	0,0%	OPCIONAL	0						0,0
3	0,00,E+00	0,0%	OPCIONAL	0						0,0

## 6. INTERFAZ REPORTE

Una vez que el diseñador oprima el botón “VER REPORTE” en la interfaz anterior, se ejecutará una macro que copiará los resultados de cada una de las interfaces de diseño y resumen, pegándolas en modo de imágenes en esta interfaz, la razón de que la macro pega los resultados como imagen se debe a que todas las tablas, las cuales tienen distintos tamaños, se ajusten en el mismo tamaño diseñado para esta interfaz. Por último, el programa graficará cada una de las alternativas diseñadas, para esto, existe una hoja de formato con la gráfica de la estructura base del pavimento el cual incluye todas las capas posibles de diseño. Cuando el diseñador define los espesores de diseño, la gráfica

LOGO CORPORATIVO	<b>MANUAL Y GUIA DE USO PROGRAMADOR DE PAVIMENTOS FLEXIBLES</b>
------------------	---

se ajusta a los tamaños establecidos conformando así, la estructura diseñada y la macro copia esta gráfica, pegandola en el reporte.

Esta interfaz está diseñada a modo de una hoja de reporte la cual recopila los parámetros de entrada, espesores, tránsito y CBR de diseño, además de los resultados obtenidos en cada una de las metodologías de diseño, SN requerido, SN suministrado, validación del método racional establecido y tabla resumen de las alternativas diseñadas con sus respectivas gráficas, estos resultados se presentan de manera secuencial y pueden ser presentados de forma consolidada en los informes que se entregan a las estidades o consorcios contratantes.

NOTA: es importante tener en cuenta las siguientes recomendaciones

- La macro grafica cada una de las alternativas diseñadas independiente de si estas son validas o no. Por lo tanto el diseñador deberá eliminar de forma manual las alternativas que no cumplan
- Cuando el diseñador requiera volver a las interfaces anteriores ya sea para verificar nuevamente los valores o realizar cambios que considere necesarios, deberá eliminar manualmente cada una de las tablas pegadas en esta interfaz que se encuentran en forma de imagen, esto debido a que cuando el diseñador vuelva a realizar el reporte, la macro no reconocerá las imágenes que pegó anteriormente para eliminarlas y pegará las nuevas sobre las ya existentes. Es por esto que el diseñador debe verificar siempre al hacer este proceso, que la interfaz se encuentre de la siguiente manera para poder regresar y generar nuevamente el reporte sin que se presente ningún tipo de error:

LOGO CORPORATIVO	<b>MANUAL Y GUIA DE USO PROGRAMADOR DE PAVIMENTOS FLEXIBLES</b>
------------------	---

Figura 21. Reporte vacío

<b>LOGO CORPORATIVO</b>	<b>DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE PROYECTO</b>																																														
<b>DATOS DE ENTRADA</b>																																															
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">TRANSITO EN EJES EQUIVALENTES N</td> <td style="width: 50%;">0.00E+00</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">SERVICIABILIDAD</td> <td>INICIAL 0</td> </tr> <tr> <td>FINAL 0</td> </tr> <tr> <td>CBR DE DISEÑO %</td> <td>0</td> </tr> </table>	TRANSITO EN EJES EQUIVALENTES N	0.00E+00	SERVICIABILIDAD	INICIAL 0	FINAL 0	CBR DE DISEÑO %	0	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 10%;">CONFIABILIDAD</td> <td style="width: 10%;">?</td> <td style="width: 10%;">PARÁMETRO R</td> <td style="width: 10%;">0</td> <td rowspan="3" style="width: 20%; text-align: center; vertical-align: middle;">                 CALCULAR TOTAL NUMERO ESTRUCTURAL REQUERIDO             </td> <td rowspan="3" style="width: 10%; text-align: center; vertical-align: middle;">0,0</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>DESVIACIÓN ESTÁNDAR ZR</td> <td>#N/D</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>ERROR ESTÁNDAR S<sub>e</sub></td> <td>0</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>SN INICIAL</td> <td>0,0</td> <td colspan="2"></td> </tr> </table>	CONFIABILIDAD	?	PARÁMETRO R	0	CALCULAR TOTAL NUMERO ESTRUCTURAL REQUERIDO	0,0			DESVIACIÓN ESTÁNDAR ZR	#N/D			ERROR ESTÁNDAR S <sub>e</sub>	0			SN INICIAL	0,0																					
TRANSITO EN EJES EQUIVALENTES N	0.00E+00																																														
SERVICIABILIDAD	INICIAL 0																																														
	FINAL 0																																														
CBR DE DISEÑO %	0																																														
CONFIABILIDAD	?	PARÁMETRO R	0	CALCULAR TOTAL NUMERO ESTRUCTURAL REQUERIDO	0,0																																										
		DESVIACIÓN ESTÁNDAR ZR	#N/D																																												
		ERROR ESTÁNDAR S <sub>e</sub>	0																																												
		SN INICIAL	0,0																																												
<p>                     LogWIB= Aplicaciones de carga de un eje equivalente a un tiempo t para alcanzar un psi=pt.                      SN= número estructural.                      ΔPSI= servicialidad inicial (pi) menos la final (pf).                      MR= módulo resiliente del suelo (A partir del CBR).                 </p>																																															
<p><b>ECUACIÓN DE DISEÑO</b></p> $\log W_{18} = Z_R S_o + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log \left[ \frac{\Delta PSI}{(4.2 - 1.5)} \right]}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.12}}} + 2.32 \log MR - 8.07$ <p>Para todas las alternativas se usó el criterio de diseño por igualación de números estructurales</p>																																															
<b>DISEÑO DE LAS CAPAS</b>																																															
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">MATERIALES</th> <th colspan="2">CARACTERÍSTICAS</th> <th colspan="2">COEFICIENTES DE DISEÑO</th> <th rowspan="2">ALTERNATIVAS</th> </tr> <tr> <th>MODULO (PSI)</th> <th>CBR (%)</th> <th>ESTRUCTURALES</th> <th>DE DRENAJE m</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RODADURA</td> <td>0</td> <td>NA</td> <td></td> <td>NO APLICA</td> <td></td> </tr> <tr> <td>BASE ASFÁLTICA</td> <td>0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>BASE GRANULAR</td> <td>0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>SUBBASE GRANULAR</td> <td>0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>ARMADO</td> <td>0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>SUBRASANTE</td> <td>0</td> <td>0,0</td> <td>NO APLICA</td> <td>NO APLICA</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	MATERIALES	CARACTERÍSTICAS		COEFICIENTES DE DISEÑO		ALTERNATIVAS	MODULO (PSI)	CBR (%)	ESTRUCTURALES	DE DRENAJE m	RODADURA	0	NA		NO APLICA		BASE ASFÁLTICA	0					BASE GRANULAR	0					SUBBASE GRANULAR	0					ARMADO	0					SUBRASANTE	0	0,0	NO APLICA	NO APLICA		
MATERIALES		CARACTERÍSTICAS		COEFICIENTES DE DISEÑO			ALTERNATIVAS																																								
	MODULO (PSI)	CBR (%)	ESTRUCTURALES	DE DRENAJE m																																											
RODADURA	0	NA		NO APLICA																																											
BASE ASFÁLTICA	0																																														
BASE GRANULAR	0																																														
SUBBASE GRANULAR	0																																														
ARMADO	0																																														
SUBRASANTE	0	0,0	NO APLICA	NO APLICA																																											
<b>VALIDACIÓN METODOLOGÍA RACIONAL</b>																																															
<b>RESUMEN ALTERNATIVAS PARA CONSTRUCCIÓN</b>																																															
<b>ALTERNATIVAS SELECCIONADAS</b>																																															

LOGO CORPORATIVO

## MANUAL Y GUIA DE USO PROGRAMADOR DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

En caso de tener toda la información correcta, la interfaz de reporte lucirá de la siguiente manera y podrá ser pegada en los respectivos informes:

LOGO CORPORATIVO		DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE PROYECTO									
<b>DATOS DE ENTRADA</b>											
<b>TRANSITO EN EJES EQUIVALENTES N</b>	0.00E+00	?	PARÁMETRO R	0	<b>CALCULAR TOTAL NUMERO ESTRUCTURAL REQUERIDO</b>	0,0					
<b>SERVICIABILIDAD</b>	INICIAL	0	DESVIACIÓN ESTÁNDAR Z <sub>R</sub>	#/0							
	FINAL	0	ERROR ESTÁNDAR S <sub>o</sub>	0							
<b>CBR DE DISEÑO %</b>	0	?	SN INICIAL	0,0							
<b>LogW<sub>18</sub></b> = Aplicaciones de carga de un eje equivalente a un tiempo t para alcanzar un psi=pt; <b>SN</b> =Número estructural; <b>ΔPSI</b> = serviciabilidad inicial (pi) menos la final (pf); <b>MR</b> = módulo resiliente del suelo (A partir del CBR).		<b>ECUACIÓN DE DISEÑO</b> $\log W_{18} = Z_R S_o + 9,36 \log(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log \left[ \frac{\Delta PSI}{(4,2 - 1,5)} \right]}{0,4 + 1,094(SN + 1)^{0,13}} + 2,32 \log MR - 8,07$									
Para todas las alternativas se usó el criterio de diseño por igualación de números estructurales											
<b>DISEÑO DE LAS CAPAS</b>											
<b>MATERIALES</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>		<b>COEFICIENTES DE DISEÑO</b>		<b>ALTERNATIVAS</b>						
	MÓDULO (PSI)	CBR (%)	ESTRUCTURALES	DRENAJE							
RODADURA	0	NA		NO APLICA							
BASE ASFÁLTICA	0										
BASE GRANULAR	0										
SUBBASE GRANULAR	0										
AFIRMADO	0										
SUBRASANTE	0	0,0	NO APLICA	NO APLICA							
<b>VALIDACIÓN METODOLOGÍA RACIONAL</b>											
<b>MÉTODO</b>		<b>PROMEDIO</b>									
<b>ALTERNATIVA</b>	<b>REPETICIONES ESPERADAS</b>	<b>PERIODO DE DISEÑO</b>	<b>ESFUERZOS Y DEFORMACIONES</b>				<b>CONSUMOS</b>		<b>OBSERVACION</b>		
			<b>CARPETA ASFÁLTICA</b>		<b>SUBRASANTE</b>		<b>CARPETA</b>	<b>SUBRASANTE</b>			
			<b>CALC</b>	<b>REPETICIONES ADM</b>	<b>CALC</b>	<b>REPETICIONES ADM</b>	<b>CALC</b>	<b>CALC</b>			
			<b>ET</b>	<b>EZ</b>	<b>EZ</b>	<b>ADM</b>	<b>%</b>	<b>%</b>			
1	0,0E+00	10	0,00E+00	#/DIV/0!	0,00E+00	#/DIV/0!	#/DIV/0!	#/DIV/0!	#/DIV/0!	#/DIV/0!	
2	0,0E+00	10	0,00E+00	#/DIV/0!	0,00E+00	#/DIV/0!	#/DIV/0!	#/DIV/0!	#/DIV/0!	#/DIV/0!	
3	0,0E+00	10	0,00E+00	#/DIV/0!	0,00E+00	#/DIV/0!	#/DIV/0!	#/DIV/0!	#/DIV/0!	#/DIV/0!	
<b>RESUMEN ALTERNATIVAS PARA CONSTRUCCIÓN</b>											
<b>RESUMEN ALTERNATIVAS PARA CONSTRUCCIÓN</b>											
<b>Alternativa</b>	<b>Ejes W<sub>18</sub></b>	<b>CBR<sub>as</sub> (%)</b>	<b>Geotextil</b>	<b>Suelo de mejoramiento 10%</b>	<b>Afirmado</b>	<b>SBG CLASE C</b>	<b>BG CLASE B</b>	<b>Base Asfáltica</b>	<b>MDC-19</b>	<b>Total</b>	
1	0,00.E+00	0,0%	OPCIONAL	0						0,0	
2	0,00.E+00	0,0%	OPCIONAL	0						0,0	
3	0,00.E+00	0,0%	OPCIONAL	0						0,0	
<b>ALTERNATIVAS SELECCIONADAS</b>											
LOGO		DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE PROYECTO									
ALTERNATIVA		1									
cm	Carpera Asfáltica MDC-19										
cm	Base Granular CLASE B										
cm	Subbase granular CLASE C										
	Suelos de subrasante										

LOGO CORPORATIVO	<b>MANUAL Y GUIA DE USO PROGRAMADOR DE PAVIMENTOS FLEXIBLES</b>
------------------	---

Por último, se presenta como evidencia, la rutina para la realización de la macro de cálculo de SN, el resto de macros, La empresa se reserva el derecho de divulgación.

```
Public Sub SNf()  
n = 8  
For i = n To Cells(1, 14) + 100  
a = 0  
b = 30  
  
Do Until Abs(Cells(i, 19)) < 0.000001  
    c = (a + b) / 2  
    Cells(i, 8) = c  
  
    If Abs(Cells(i, 19)) < 0.000001 Then  
        Cells(i, 8) = c: Exit Do  
    ElseIf Cells(i, 16) < Cells(i, 17) Then  
        b = c  
  
    Else  
        a = c  
  
    End If  
  
Loop  
n = n + 22  
  
Next  
n = n + 22  
  
End Sub
```