

**EVALUACIÓN DE LA METODOLOGÍA UTILIZADA PARA LA MODELACIÓN DE
ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO FLEXIBLE, CON PROPÓSITOS DE
REHABILITACIÓN, EN LOS DEPARTAMENTOS DE CALDAS, QUINDÍO Y
RISARALDA.**

Ing. CARLOS ABDIEL CASTAÑO CASTELLANOS

Ing. JUVENAL MARTÍNEZ OROZCO

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN – MANIZALES
FACULTAD DE MINAS
ESPECIALIZACIÓN EN VÍAS Y TRANSPORTE**

Manizales, julio de 2002

**EVALUACIÓN DE LA METODOLOGÍA UTILIZADA PARA LA MODELACIÓN DE
ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO FLEXIBLE, CON PROPÓSITOS DE
REHABILITACIÓN, EN LOS DEPARTAMENTOS DE CALDAS, QUINDÍO Y
RISARALDA.**

Ing. CARLOS ABDIEL CASTAÑO CASTELLANOS

Ing. JUVENAL MARTÍNEZ OROZCO

**MONOGRAFÍA PARA OPTAR AL TÍTULO DE ESPECIALISTAS EN VÍAS Y
TRANSPORTE**

DIRECTOR: Ing. LUIS CARLOS VÁSQUEZ TORRES

ASESOR: Ing. LUIS RICARDO VÁSQUEZ VARELA

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN – MANIZALES
FACULTAD DE MINAS
ESPECIALIZACIÓN EN VÍAS Y TRANSPORTE**

Manizales, julio de 2002

Este trabajo está dedicado a nuestras familias, quienes todo el tiempo estaban pendientes y, brindándonos apoyo cuando más lo necesitábamos, por ellos iniciamos, por ellos seguimos y, por ellos salimos adelante.

AGRADECIMIENTOS

- A Dios, quien nos dio la oportunidad de dar un paso más adelante.
- A todas y cada una de las personas que nos soportaron y acompañaron durante este tiempo en el que volvimos a las aulas.
- A nuestras familias quienes nos apoyaron durante todo el tiempo, con todas las fuerzas de su corazón y espíritu.
- A nuestros buenos profesores.
- A nuestros profesores, quienes aceptaron dirigirnos y asesorarnos, en el trabajo que aquí presentamos.

CONTENIDO

	pág.
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vi
LISTA DE CUADROS	ix
LÍSTA DE FIGURAS	xi
RESUMEN	xii
INTRODUCCIÓN	14
1. OBJETIVOS	17
1.1 OBJETIVOS GENERALES	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2. MARCO TEORICO	19
2.1 MODELACION DE PAVIMENTOS FLEXIBLES	19
2.1.1 DEFINICION GENERAL	19
2.1.2 PROCEDIMIENTO ESPECIFICO DE MODELACIÓN PARA VIGA BENKELMAN	21
2.1.3 SECTORIZACION DE PROYECTOS DE REHABILITACIÓN	21
2.1.4 DEFLECTOMETRIA CON VIGA BENKELMAN	22
2.1.5 GEOTECNIA	24
2.1.6 ASIGNACION DE MODULOS INICIALES O	

MÓDULOS SEMILLA	25
2.1.7 RELACION DE POISSON	26
2.1.8 DETERMINACION DEL TRANSITO	27
2.1.9 PROGRAMAS DE COMPUTADOR PARA ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS MULTICAPA ELASTICA	28
2.2 DISEÑO DE SOLUCIONES DE REHABILITACIÓN	30
2.2.1 VERIFICACION EMPIRICO MECANICISTA DE LAS SOLUCIONES DE REHABILITACIÓN	31
2.2.2 FUNCION DE TRANSFERENCIA PARA AGRIETAMIENTO	36
2.2.3 FUNCION DE TRANSFERENCIA PARA AHUELLAMIENTO	37
2.2.4 MODULO DINAMICO Y LEY DE FATIGA DEL CONCRETO ASFALTICO MDC-2	37
3 ANALISIS DE PROYECTOS	41
3.1 PEREIRA – MARSELLA	42
3.2 CERRITOS - CAUYÁ	57
3.3 AVENIDA 30 DE AGOSTO	89
4 PAUTAS PARA UNA MODELACION ADECUADA	114
5 CONCLUSIONES	119
BIBLIOGRAFÍA	121
ANEXOS	123

LISTA DE CUADROS

	pág.
CUADRO 1 RELACIONES DE POISSON	27
CUADRO 2 VALORES DE CONFIABILIDAD AASHTO	34
CUADRO 3 COEFICIENTE K_c	34
CUADRO 4 COEFICIENTE K_s	34
CUADRO 5 VALORES DE S_N Y S_h	35
CUADRO 6 VALORES DE A PARA ϵ_z ADMISIBLE	35
CUADRO 7 MODELACIÓN CONSULTOR PEREIRA - MARSELLA	42
CUADRO 8 MODELACIÓN KENLAYER PEREIRA – MARSELLA	43
CUADRO 9 MODELACIÓN UNALCAPA PEREIRA – MARSELLA	44
CUADRO 10 DISEÑO CONSULTOR PEREIRA – MARSELLA	48
CUADRO 11 ESFUERZOS ADMISIBLES PEREIRA – MARSELLA	51
CUADRO 12 DISEÑO AUTORES PEREIRA – MARSELLA	52
CUADRO 13 MODELACIÓN CONSULTOR CERRITOS – CAUYÁ	57
CUADRO 14 MODELACIÓN KENLAYER CERRITOS – CAUYÁ	58
CUADRO 15 MODELACIÓN UNALCAPA CERRITOS - CAUYÁ	59
CUADRO 16 DISEÑO CONSULTOR CERRITOS – CAUYÁ ALT 1	65
CUADRO 17 DISEÑO CONSULTOR CERRITOS – CAUYÁ ALT 2	66

CUADRO 18	ESFUERZOS ADMISIBLES CERRITOS – CAUYÁ	76
CUADRO 19	DISEÑO AUTORES CERRITOS – CAUYÁ	77
CUADRO 20	MODELACIÓN CONSULTOR AVENIDA 30 DE AGOSTO	89
CUADRO 21	MODELACIÓN KENLAYER AVENIDA 30 DE AGOSTO	90
CUADRO 22	MODELACIÓN UNALCAPA AVENIDA 30 DE AGOSTO	91
CUADRO 23	DISEÑO CONSULTOR AVENIDA 30 DE AGOSTO	97
CUADRO 24	ESFUERZOS ADMISIBLES AVENIDA 30 DE AGOSTO	105
CUADRO 25	DISEÑO AUTORES AVENIDA 30 DE AGOSTO	106
CUADRO 26	CUADRO COMPARATIVO DE ε_t	108

LISTA DE FIGURAS

	pág.
FIGURA 1 MÓDULO DE CARPETA VRS T° MIX	39
FIGURA 2 T° AMBIENTE VRS T° MIX	40
FIGURA 3 ϵ_t VRS ESPESOR CARPETA PEREIRA – MARSELLA	56

RESUMEN

El diseño y rehabilitación de los pavimentos flexibles es aún tema de estudio e investigación, como consecuencia de los diversos resultados obtenidos en la construcción y, particularmente, la recuperación de la estructura de las carreteras pavimentadas.

Este trabajo realiza una evaluación de la modelación multicapa elástica de las estructuras de los pavimentos, comúnmente utilizada en la región cafetera y en muchas zonas de Colombia, aplicando métodos mecanicistas para establecer soluciones de recuperación. Se trata de confrontar los conceptos técnicos y parámetros establecidos para las modelaciones y aquellos realmente utilizados por los consultores, determinando las diferencias que de ello se derivan y que al ser aplicadas pueden ofrecer resultados objetables e inadecuados comportamientos en las estructuras rehabilitadas.

Se hace una comparación entre los resultados obtenidos por algunos diseñadores en proyectos de la región cafetera y aquellos derivados de los programas Unalcapa (Vásquez, 2002) y Kenlayer (Huang, 1993).

Abstract: The design and rehabilitation of flexible pavements, is still subject of study and investigation, as a consequence of the diversity of obtained results during construction and, specially, in reconstruction of paved roads.

This work makes an evaluation of the most commonly used pavement structures modeling in the coffee-growing region and some others areas in Colombia, by using mechanistic methods in order to achieve solutions for pavement recovering. It seeks to compare technical concepts and fixed parameters in modeling, with those actually used by consultants or designers, obtaining differences of this comparison which can to lead bad results and non expected behavior.

A comparison between coffee-growing region designers' obtained results and those derived from the UNALCAPA and KENLAYER programs, is made.

Keywords: flexible pavement, modeling, mechanistic methods, rehabilitation, reconstruction, UNALCAPA, KENLAYER.

INTRODUCCIÓN

Las carreteras son un factor importante en el desarrollo económico de una región. El transporte es un elemento de gran influencia en la economía del país. La serviciabilidad de las carreteras contribuye al desarrollo económico de una región con proyectos viales que facilitan el mejoramiento del nivel de vida de la población. Dicha serviciabilidad es función directa del estado superficial y estructural del pavimento.

En el proceso de modelación y diseño de pavimentos flexibles existen criterios subjetivos sobre algunos de los parámetros que utilizan los programas de computador. Se observa una tendencia a la aplicación de fórmulas empíricas por parte de los diseñadores, derivadas de algunas experiencias particulares, sin tener en cuenta los patrones establecidos por entidades como la SHELL, AASHTO y otras que desarrollaron los métodos de cálculo de uso común en el medio.

El interés por analizar los proyectos de diseño y recuperación estructural de pavimentos está directamente relacionado con la experiencia de los autores en la construcción y resultados obtenidos en proyectos similares.

Los autores han podido identificar de forma general algunas tendencias en el proceso de modelación de estructuras de pavimento flexible, tales como: incongruencias en el análisis geotécnico y en la asignación de módulos dinámicos del concreto asfáltico, modificación en los espesores existentes al momento de formular el modelo y omisión de información de campo necesaria, entre otras. Las anteriores anomalías redundan en un diseño de rehabilitación inadecuado.

Con la evaluación de la metodología de modelación para pavimentos flexibles utilizada en la región cafetera, se analiza un elemento de la mayor importancia en la formulación de estudios para la rehabilitación de las vías.

El proyecto pretende mostrar la incorrecta caracterización de materiales aplicada en los programas de análisis para la modelación de estructuras nuevas o existentes de pavimentos. El trabajo tiene en cuenta diseños realizados recientemente para una mayor aproximación al actual esquema de diseño y a las decisiones de rehabilitación implementadas.

El objeto de esta tesis son tres (3) carreteras de la región cafetera de reciente estudio y rehabilitación, en las cuales se realizaron estudios de deflectometría, inventario de daños y exploración geotécnica de los pavimentos existentes. Dichas vías evaluadas son: Pereira – Marsella, Avenida 30 de Agosto y Cerritos – Cauya (Ruta 25 de INVIAS).

En cada proyecto, una vez se determinan los errores cometidos al realizar las modelaciones, se establecen las diferencias entre los diseños de rehabilitación propuestos por los consultores y aquellos formulados por los autores de este estudio. No obstante, es pertinente aclarar que se aceptan las sectorizaciones establecidas en los estudios, los resultados de los ensayos de laboratorio, los inventarios de daños y no se consideran los posibles errores de lectura de las deflexiones con la viga Benkelman, ya que el establecimiento de anomalías a este nivel requieren la repetición de los estudios, lo cual es ajeno a la capacidad económica de los autores.

1 OBJETIVOS

1.1. OBJETIVOS GENERALES

Se comparan resultados de modelaciones realizadas por empresas de consultoría, para el diseño de pavimentos flexibles en algunas vías de los departamentos de Caldas, Quindío y Risaralda, con la modelación que realizaron los autores utilizando los programas DEPAV, KENLAYER, UNALCAPA y realizando la verificación por el método mecanicista de la solución de rehabilitación derivada de la correcta modelación.

1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- a. Análisis previo de las características tales como tránsito, espesores de capas, ubicación, clima, deflectometría, resultados geotécnicos y módulos asumidos en cada una de las tres (3) vías sobre las cuales se efectuaron las modelaciones de verificación.
- b. Adopción de las variables, sectorización y caracterización de cada proyecto realizada por el respectivo consultor. No se modifica la agrupación ni los valores adoptados, con el fin de que las modelaciones sean plenamente comparables.

- c. Detección de los errores más comunes y realización de nuevas modelaciones y diseños por medio del método mecanicista francés. Se pretende hacer una evaluación al proceso de modelación y consecuentemente al diseño realizado en los tres proyectos en estudio, como también a los resultados obtenidos y encontrar la incidencia técnica en dichas carreteras.

- d. De acuerdo con los resultados de la modelación y estructuras comparativas, se sugieren nuevos planteamientos o recomendaciones de rehabilitación para las carreteras estudiadas.

- e. Se efectúa el diagnóstico de las causas que generan las modificaciones de concepto en el proceso de modelación. Se trata de explicar porque se hicieron variaciones en el manejo de las constantes dentro del programa de diseño y la interpretación de resultados. Se sugiere una guía como solución a dudas e inconvenientes que puedan presentarse, para futuros usuarios de los programas, en el análisis de las características y condiciones de las capas en la estructura de los pavimentos.

2. MARCO TEORICO

2.1 MODELACION DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

2.1.1 DEFINICION GENERAL

La modelación multicapa elástica es un procedimiento de análisis que permite establecer las características mecánicas de una estructura de pavimento mediante un proceso de evaluación integral y la compatibilidad del comportamiento real con el simulado.

El objetivo parcial de la modelación es obtener las características de resistencia de los diferentes materiales constitutivos de la estructura (módulos resilientes), de manera que reflejen en el modelo un comportamiento similar al medido en el terreno (Retrocálculo).

Desde el punto de vista empírico-mecanicista y en el ejercicio actual del análisis, una estructura de pavimento se presume como un sistema multicapa conformado por materiales linealmente elásticos, isotrópicos y homogéneos, que pueden caracterizarse por un módulo de elasticidad (E_i), una relación de Poisson (μ_i) y un espesor definidos, incluso en modelos que consideren la profundidad de la n -ésima capa como infinita.

Asimismo el modelo acepta determinaciones sobre la condición de las interfaces de las capas. El modelo multicapa elástico utilizado está basado en los principios de la teoría de Burmister.

El análisis de tensiones y deformaciones en el modelo permite obtener, en cualquier punto de cualquier capa, las tensiones y deformaciones que producirá una determinada carga sobre la superficie. Por otra parte, en campo se obtiene una sectorización de la vía en función del inventario de daños, la deflectometría y la exploración geotécnica. Esta información produce una serie de estimados para alimentar el precitado modelo multicapa en la búsqueda de una representación numérica de la realidad.

No obstante, aparte de la dispersión que determina el hecho de que las características reales de cada punto de la estructura de la carretera varíen en relación con las uniformes adoptadas en la modelación, así como la realidad de existencia de discontinuidades en un medio supuesto teóricamente continuo, se plantea cómo pueden establecerse los valores de las variables indicadas para que los resultados (tensiones y deformaciones) tengan la máxima representatividad.

2.1.2 PROCEDIMIENTO ESPECIFICO DE MODELACION PARA VIGA

BENKELMAN

En el universo específico de este trabajo, la modelación se realiza mediante un proceso iterativo controlado por los resultados obtenidos de las deflexiones de campo, medidas con la viga Benkelman doble, a las cuales se debe aproximar durante el proceso. Se pueden obtener varios resultados de la modelación para la misma estructura de acuerdo con la pareja de deflexiones de control D_0 y D_{25} escogidas, ya sea mediante un promedio u otro valor elegido con alguna cobertura estadística.

2.1.3 SECTORIZACION DE PROYECTOS DE REHABILITACION

La sectorización en relación con la estructura es un factor de la mayor importancia dentro de la correcta modelación, tanto como la obtención de la información sobre las características de los materiales existentes. Se pueden resumir las condiciones para una buena sectorización de tramos homogéneos, así:

- Características de la subrasante definidas en los ensayos efectuados a los materiales durante la exploración geotécnica.
- Estructura del pavimento: variaciones en las características o espesores de los materiales que la componen.

- Tráfico: Tramos de igual tránsito en su composición, volumen y resultados de proyección.
- Velocidad de circulación: Es importante en la aplicación de las cargas y deformaciones generadas por condiciones del trazado, pendientes y curvatura.
- Condiciones climatológicas: Influencia de la temperatura ambiente y del pavimento.
- Comportamiento observado: Información recopilada y otras condiciones meteorológicas en la estructura del pavimento.

Para el caso de los proyectos objeto del presente estudio, se tomó la misma sectorización utilizada por los consultores, con el fin de realizar la comparación propuesta en los procesos de modelación

.

2.1.4 DEFLECTOMETRIA CON VIGA BENKELMAN

Característica obtenida mediante la medición de las DEFLEXIONES con Viga Benkelman doble, que representa la recuperación elástica (deformación recuperable) medida sobre una vertical a la superficie del pavimento cuando deja de actuar la carga que la produce, normalizada como una rueda doble (E 795 - INVIAS). Mide la suma de las deformaciones de todas las capas del pavimento.

En la metodología empleada con la viga Benkelman doble se miden dos valores de deflexiones: D_0 que es la medida debajo del eje de carga y D_{25} , medida a 25 cms. de la anterior.

La información de las deflexiones, para este estudio, se tomó de los datos de campo obtenidos por los consultores. Se procesó por medio del programa DEFLEX y se determinó la deflexión promedio de cada tramo establecido. Los datos referentes a información de la vía, tramo, carril, abscisado se consignaron iguales a los del estudio original.

Para la modelación se elige como deflexión de control, el valor promedio de los resultados obtenidos de la información de campo, eligiendo la pareja D_0 y D_{25} existente que tenga mayor aproximación a los valores promedio del estudio estadístico. La modelación de estructuras promedio es necesaria dado que se utilizará una adaptación del método de diseño Empírico-Mecanicista Francés, (LCPC-SETRA 1997), para el dimensionamiento de los refuerzos en la parte final del trabajo de grado.

Este procedimiento de escogencia de la deflexión contrasta con el empleado por los consultores donde es evidente la necesidad de establecer un modelo cualquiera como consecuencia de un análisis mecánico inapropiado.

2.1.5 GEOTECNIA

Se tomó la información geotécnica obtenida por los consultores de los proyectos, para que la verificación del diseño se efectúe bajo los mismos parámetros establecidos por ellos, sobre la naturaleza y espesores de las capas constitutivas del pavimento. Se utilizan los resultados de CBR, PDC (penetrómetro dinámico de cono), humedades, límites de Atterberg, condiciones de drenaje, composición y clasificación de los suelos que conforman las estructuras de los pavimentos y que aparecen en las memorias de los informes originales.

Para elegir los apiques se tomaron los datos del más cercano al punto donde se ubicó la deflexión promedio de control, de esta manera se realiza la mejor aproximación a las características de la estructura en el proceso de modelación. Cabe anotar que en algunos casos, los consultores modelan estructuras inexistentes.

Se identificaron las condiciones del estado superficial de la calzada siguiendo la información de daños superficiales suministrada por el consultor para cada uno de los sectores en los cuales dividió la carretera. En términos generales se adoptó la misma evaluación de daños definida en los estudios originales y así establecer el estado del pavimento como Bueno, Regular o Malo.

2.1.6 ASIGNACION DE MODULOS INICIALES O MODULOS SEMILLAS

CAPAS ASFÁLTICAS:

Para cada tipo de estructura se consideran tres valores del módulo de elasticidad, propios de los concretos asfálticos densos cuando son solicitados por una carga cuasi estática, condición propia del ensayo de viga Benkelman ($t = 3.5$ segundos) (Murgueitio, 1989).

- a. Capa asfáltica no fisurada. $E = 13.000 \text{ Kg/cm}^2$
- b. Capa asfáltica fisurada pero con bloques sin movilidad al paso de las cargas.
 $E = 5.000 \text{ Kg/cm}^2$
- c. Capa asfáltica fisurada, bloques que tienen movilidad. $E = 1.400 \text{ Kg/cm}^2$

MATERIALES GRANULARES:

Las capas granulares no ligadas, desarrollan un módulo de elasticidad que puede calcularse de acuerdo con el espesor de la capa y de la rigidez de la superficie de apoyo (módulo de la capa subyacente). Con esta aproximación se utilizan ecuaciones para el cálculo de los módulos de elasticidad iniciales, como las propuestas por el USCOE (Barker, et al. 1977) con recomendaciones sobre el espesor máximo al cual pueden aplicarse son:

$E_{SB} = E_{SR} \times (5.35 \log h_{SB} + 0.62 \log E_{SR} - 1.56 \log h_{SB} \log E_{SR} - 1.13)$ $h_{m\acute{a}x} = 20$ cm. (Ecuación 1).

$$E_B = E_{SB} \times (8.05 \log h_B + 0.84 \log E_{SB} - 2.10 \log h_B \log E_{SB} - 2.21) \quad h_{\text{máx}}=25 \text{ cm.}$$

(Ecuación 2).

Para mayores espesores se recomienda subdividir el espesor en capas de 15 o 20 centímetros, calcular los E respectivos y ponderar los valores obtenidos.

MATERIAL DE SUBRASANTE:

En la caracterización de la subrasante se utilizan correlaciones para establecer el módulo resiliente de la subrasante a partir de los resultados de ensayos de CBR medido en el sitio, en lo posible en la abscisa representativa de la sección homogénea.

$$M_R = 130 \times \text{CBR}^{0.714} \quad (\text{Kg/cm}^2) \quad (\text{Ecuación 3}) \quad (\text{Lilli F.J. Curso de Diseño Racional Pavimentos Flexibles, Popayán, 1987})$$

$$M_R = 100 \times \text{CBR} \quad (\text{Kg/cm}^2) \quad (\text{Ecuación 4}) \quad (\text{SHELL, 1978})$$

2.1.7 RELACION DE POISSON

Tiene importante influencia en las deflexiones. Su valor es difícil de determinar. Se utilizan valores recomendados para cada tipo de material.

Cuadro 1

RELACIONES DE POISSON

MATERIAL DE PAVIMENTO	RELACION DE POISSON	RECOMENDACION
Concreto de cemento Pórtland	0.15 – 0.20	0.15
Concreto asfáltico	0.5 para E menor a 500 ksi	0.35
	0.3 para E mayor a 500 ksi	
Base o subbase granular no ligada	0.3 - 0.35	0.35
Base o subbase estab. químicamente	0.2	
Subrasante cohesiva	0.4	0.45
Subrasante no cohesiva	0.3	

(Joint Departamentos of the Army and Air Force, 1994)

2.1.8 DETERMINACION DEL TRANSITO

La fatiga acumulada en los pavimentos se observa por los agrietamientos o deformaciones en la superficie. Es producida por la acción repetida del paso de los vehículos. En pavimentos nuevos o rehabilitaciones el tránsito se maneja utilizando la conversión a ejes sencillos de 8.2 toneladas, calculando el número de repeticiones de este eje en el período de diseño.

En los proyectos que se analizan , el tránsito está dado en ESAL, elemento necesario para correr el programa DEPAV con el cual se modelan y diseñan los tres (3) proyectos.

Los proyectos objeto del estudio no presentan el estudio de tránsito. Se tomaron los valores dados por los consultores sin hacer verificación o análisis. La cantidad de repeticiones de ejes se establecen como sigue:

Pereira – Marsella : 320.000 ESAL.

Cerritos – Cauyá: 7´200.000 ESAL

Avenida 30 de Agosto : 14´500.000 ESAL

2.1.9 PROGRAMAS DE COMPUTADOR PARA ANALISIS DE ESTRUCTURAS MULTICAPA ELASTICA

En el desarrollo de este trabajo se utilizan los siguientes programas:

- DEPAV
- KENLAYER
- UNALCAPA

El DEPAV es un programa elaborado por la Universidad del Cauca, adaptación del programa francés ALIZE III del Laboratoire Central de Ponts et Chaussées (LCPC). Calcula los esfuerzos y las deformaciones máximas producidas en las interfaces de un sistema elástico multicapa por una rueda doble colocada en la superficie. Este sistema puede estar constituido entre dos a seis capas caracterizadas por el espesor, el módulo de elasticidad y la relación de Poisson. Los autores del presente trabajo lo usan para el diseño de la estructura del pavimento.

El programa KENLAYER, escrito por Yang H. Huang, utilizado para el análisis de pavimentos flexibles, resuelve sistemas de pavimentos de varias capas de material elástico sometidos a una carga circular. Puede ser aplicado a sistemas de varias capas sometidos a cargas de rueda simple, dual tándem o dual trídem con cada capa comportándose de forma diferente, sea de manera elástica-lineal, elástica-no-lineal o viscoelástica. El programa puede realizar análisis de daños y aplicarse a un sistema de pavimento de 19 capas como máximo. En el análisis de ruedas simples, se pueden obtener resultados hasta para 10 coordenadas radiales y 19 coordenadas verticales, es decir un total de 190 puntos. Para análisis de ruedas múltiples, además de las 19 coordenadas verticales, se pueden obtener soluciones en 25 puntos, especificando las coordenadas x e y de cada punto.

El Programa UNALCAPA es una Interface en ambiente Windows del programa Julea de la FAA, cuyo código original fue desarrollado por Uzan, para el análisis de estructuras multicapa elásticas.

La interface prepara archivos de entrada para el motor de cálculo y procesa las respuestas del modelo con énfasis en el ensayo de viga Benkelman.

2.2 DISEÑO DE SOLUCIONES DE REHABILITACION

Los consultores realizaron el diseño de refuerzos de pavimentos flexibles siguiendo métodos de diseño como el establecido en la Guía AASHTO (1993), SHELL y una aproximación mecanicista.

Los autores del presente trabajo decidieron utilizar otra metodología aplicando los programas KENLAYER Y UNALCAPA para la modelación de las estructuras existentes en los proyectos estudiados y DEPAV para la verificación empírico-mecanicista del diseño de rehabilitación.

La solución de rehabilitación consiste en la colocación, sobre el pavimento existente, de una nueva carpeta asfáltica, con o sin capas granulares de refuerzo o fresado previo, de un espesor tal que todo el sistema estructural resultante sea suficiente para soportar el número de repeticiones de carga esperado durante el período de análisis definido como prolongación de la vida de servicio de la vía.

2.2.1 VERIFICACION EMPIRICO-MECANICISTA DE LAS SOLUCIONES DE REHABILITACION

Método adaptado por el ingeniero Luis Ricardo Vásquez Varela para implementar funciones de transferencia diferentes a la sugerida por la guía francesa.

“El procedimiento de diseño mecanicista integra elementos como el tránsito, efectos climáticos, el modelo estructural y la respuesta del pavimento, la caracterización de los materiales, las funciones de transferencia y el análisis del comportamiento para concluir con el proceso de selección del sistema de pavimento a construir”. (VASQUEZ,2002)

Es de gran importancia la relación que hay entre el comportamiento de la estructura modelada para unas condiciones y asociada con un tipo de falla, con el nivel de desempeño esperado y que puede ser medido hasta el final de su vida útil de diseño para la categoría de serviciabilidad prevista. Para analizar el comportamiento se usan dos criterios:

ϵ_t : Deformación unitaria por tensión en la superficie inferior de la capa asfáltica. Valor máximo admisible de la tracción en el plano inferior de la carpeta asfáltica en strain (mm/mm).

ϵ_z : Deformación unitaria por compresión en la parte superior de la subrasante en strain (mm/mm).

Para la verificación mecanicista se usa el método francés expuesto en el Manual Francés de Diseño de Estructuras de Pavimento (LCPC-SETRA, 1997) con las modificaciones definidas por Vásquez Varela (2002). Se maneja el concepto de esfuerzos (deformaciones unitarias) de trabajo en las distintas capas de pavimento. Los valores admisibles de estos esfuerzos son definidos por las características de fatiga del material, el tránsito acumulado y riesgo calculado. Los esfuerzos se corrigen con factores que consideran las diferencias entre la teoría y el comportamiento observado en los pavimentos y puede determinarse según las siguientes relaciones:

- Falla por flexión o agrietamiento en la superficie inferior de la capa asfáltica:

$$\varepsilon_{tadm} = \varepsilon(NE, \theta_{eq}, f) K_r K_c K_s \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde $\varepsilon(NE, \theta_{eq}, f)$ es la deformación unitaria correspondiente a la ocurrencia de la falla por flexión, con un 50% de probabilidad, donde:

NE = número de repeticiones admisibles para prevenir agrietamiento.

θ_{eq} = temperatura equivalente

f = frecuencia, características de los esfuerzos que soportará la capa considerada.

Las constantes o factores de ajuste $K_r K_c K_s$ son coeficientes que afectan la deformación unitaria por distintas causas:

K_r = Ajuste del riesgo según los intervalos de confianza alrededor del espesor.

Debido a la ausencia de información detallada sobre el tránsito se adoptó un riesgo para todos los proyectos del 15 %, el cual puede enmarcarse apropiadamente en las experiencias norteamericanas reportadas por la AASHTO (AASHTO,1993).

Cuadro 2

CONFIABILIDAD RECOMENDADA POR AASHTO

CLASIFICACIÓN FUNCIONAL	CONFIABILIDAD RECOMENDADA (R)	
	URBANO	RURAL
Interestatal y otras autopistas	85 - 99.9	80 - 99.9
Arterias principales	80 - 99	75 - 95
Colectoras	80 - 95	75 - 95
Locales	50 - 80	50 - 80

R=Reliability, Confiabilidad. Confiabilidad=1-riesgo

Cuadro 3

COEFICIENTE K_c

MATERIAL	Base asfáltica	Concreto asfáltico	Concreto asfáltico de alto módulo
k _c	1.3	1.1	1.0

K_c = Ajusta los comportamientos calculado y observado en la realidad.

K_s = Reducción por falta de uniformidad en la capacidad portante de una capa de suelo blando debajo de las capas tratadas.

Cuadro 4

COEFICIENTE K_s

MÓDULO	E _{SR} < 50,000 KPa	50,000 ≤ E _{SR} < 120,000 KPa	E _{SR} ≥ 120,000 KPa
k _s	0.83333333	0.90909091	1.0

Cuadro 5

VALORES RECOMENDADOS DE SN y Sh

Concreto asfáltico	Módulo Mín. Mpa, 20°C - 10 Hz	-1/b	SN	Sh
Clase 1	5.000	5	0,4	Concreto asfáltico: 1 cm Base asfáltica: El mínimo entre: El máximo entre 1 cm y (0.3h-2), y 2.5 cm.
Clase 2	6.300	5	0,3	
Clase 3	6.300	5	0,3	
Concreto asfáltico de alto módulo				
Clase 1	11.000	5	0,3	
Clase 2	11.000	5	0,25	

- Falla por compresión en la parte superior de la subrasante :

$$\epsilon_{z \text{ adm}} = A (NE)^{-0.222} \text{ (Ecuación 6)}$$

A = definida de acuerdo con el tránsito del Manual Francés de Diseño

Cuadro 6

VALORES DE A EN EL CRITERIO DE $\epsilon_{z \text{ admisibles}}$

TRANSITO	VALOR DE A
$T \geq 150$	0.012
$T < 150$	0.016

2.2.2 FUNCION DE TRANSFERENCIA PARA AGRIETAMIENTO

Previamente se enunció el uso de una función de transferencia $\varepsilon(\text{NE}, \theta_{\text{eq}}, f)$ para agrietamiento. Este es un factor de carácter empírico derivado de observaciones de comportamiento en laboratorio y campo, que conecta los fenómenos que ocurren durante la vida útil y la terminación de la misma en un pavimento.

Se define la función de transferencia como el vínculo entre la respuesta de la estructura de pavimento, predicha por el modelo estructural y el comportamiento (performance) o nivel de servicio esperado (VASQUEZ 2002).

Para el desarrollo de la verificación empírico-mecanicista de las soluciones de rehabilitación se adopta la función de transferencia para agrietamiento de Das y Pandey. (DAS & PANDEY, SEPT. 1999)

DAS & PANDEY

Estos dos autores son profesores del Departamento de Ingeniería Civil del Instituto Tecnológico de la India, Kharagpur, India. Desarrollaron los criterios de fatiga partiendo de ensayos de laboratorio, efectuando ensayos de flexión a vigas de concreto asfáltico. con una frecuencia de carga de 10 Hz y una variación en la magnitud de la carga desde 80 a 800 Newton para temperaturas controladas de 20, 25 y 30 °C.

La siguiente ecuación de regresión deriva de los ensayos de fatiga en laboratorio:

$$N_f = 5,975 \times 10^{-5} (1/\varepsilon_t)^{3.565} (1/Mr)^{1.4747} \quad (\text{Ecuación 7})$$

N_f = número de repeticiones para la falla por fatiga en laboratorio

ε_t = esfuerzo de tensión por debajo de la viga de concreto asfáltico

r^2 = coeficiente de determinación=0.74

2.2.3 FUNCION DE TRANSFERENCIA PARA AHUELLAMIENTO

Para la deformación vertical unitaria en la subrasante se tomará el criterio francés, expuesto previamente.

$$\varepsilon_{z \text{ adm}} = 0.016 (NE)^{-0.222} \quad (\text{Ecuación 8})$$

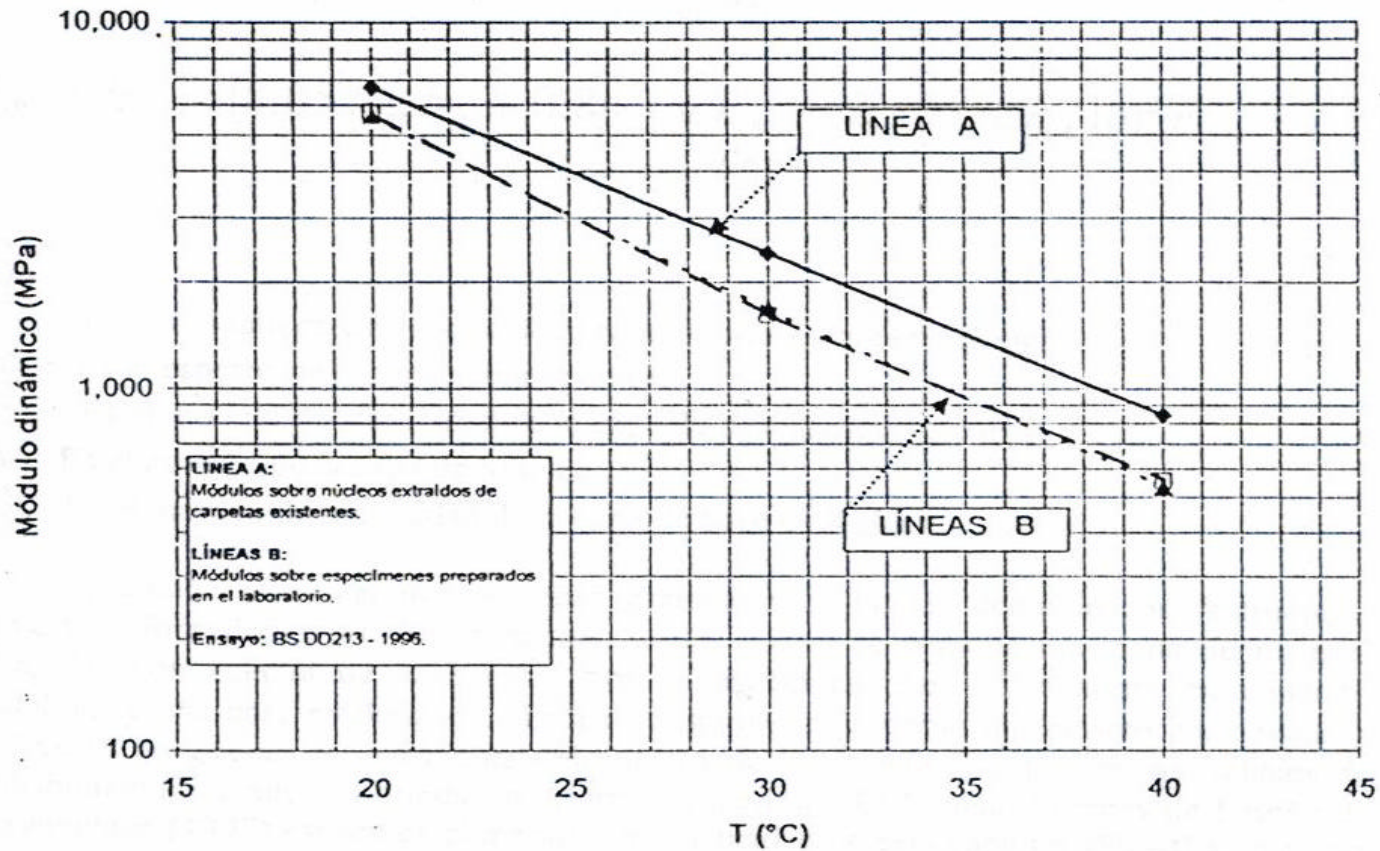
2.2.4 MODULO DINAMICO Y LEY DE FATIGA DEL CONCRETO ASFALTICO MDC-2

Para efectuar un análisis de la solución de rehabilitación es necesario conocer las características de la capa asfáltica que se colocará como refuerzo, representadas por su módulo de elasticidad dinámico y su Ley de fatiga.

El módulo dinámico del concreto asfáltico se determina mediante ensayos triaxiales dinámicos sobre briquetas elaboradas con la fórmula de trabajo de la mezcla, con ensayos de tensión indirecta o ensayos de creep.

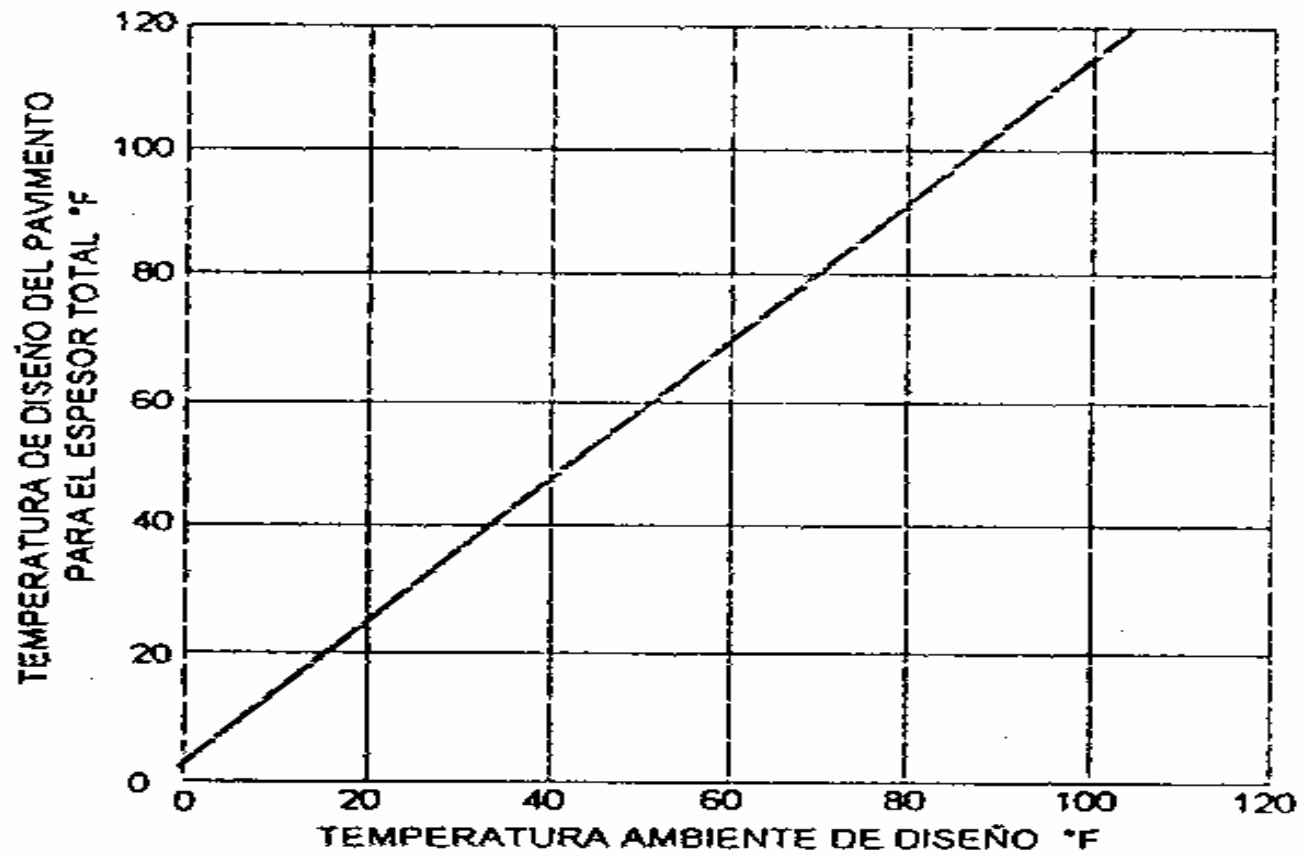
El módulo que debe utilizarse para el cálculo de la estructura debe ser el aplicable a la temperatura del pavimento establecida de la información climatológica. En las Figuras 1 y 2 se presentan las curvas para corregir la temperatura ambiental y para predecir el módulo del concreto asfáltico de acuerdo con las investigaciones realizadas por el USCOE. (VASQUEZ,2002).

MÓDULO DEL CONCRETO ASFÁLTICO TIPO MDC-2



Variación de la resistencia de mezclas asfálticas tipo MDC-2 con la temperatura (1MPa = 1,000 kPa).

FIGURA 1



Relación entre la temperatura promedio de diseño del pavimento y la temperatura ambiente.

FIGURA 2

3. ANÁLISIS DE PROYECTOS

A continuación se presentan los proyectos estudiados, Pereira – Marsella, Cerritos - Cauyá y Avenida 30 de Agosto en su orden, donde se presenta la modelación del consultor, la modelación de los autores y su comparación, de igual forma se encuentra la modelación.

3.1 PROYECTO PEREIRA – MARSELLA

Cuadro 7

RESUMEN DE MODELACIÓN CONSULTOR PROYECTO PEREIRA - MARSELLA

TRAMO	1	UNIDAD
DEFLEXIONES DEPAV		
Do	57	1/1000 plg
RADIO DE CURVATURA Rc	25	M
MÓDULO CARPETA	19912.66	Psi
ESPEJOR CARPETA	1.97	Plg
CONDICIÓN DE LIGA	SI	
MODULO BASE GRANULAR	12658.78	Psi
ESPEJOR CAPA GRANULAR	13.78	Plg
CONDICIÓN DE LIGA	SI	
MODULO SUBRASANTE	4409.24	Psi
DEFLEXIONES UNALCAPA		
Do	57	1/1000 plg
D25	38	1/1000 plg
RADIO BENKELMAN	65	m
CBR SUBRASANTE		
Módulo semilla SR	8664.86	psi

Nota: La deflexión Do y el radio de curvatura Rc, son tomados de los resultados en DEPAV.

Nota2: La deflexión Do y el radio de curvatura Rc, son tomados de los resultados en DEPAV.

Cuadro 8

RESUMEN DE MODELACIÓN AUTORES
PROYECTO PEREIRA – MARSELLA
PROGRAMA: KENLAYER

TRAMO	1	2	UNIDAD
DEFLEXIONES MEDIDAS			
Do	134	138	1/100 mm
D25	86	98	1/100 mm
MÓDULO CARPETA	137,293.00	137,293.00	KPa
ESPESOR CARPETA	0.06	0.04	m
CONDICIÓN DE LIGA	SI	SI	
MODULO BASE GRANULAR	85,000.00	155,000.00	KPa
ESPESOR CAPA GRANULAR	0.39	0.23	m
CONDICIÓN DE LIGA	NO	NO	
MODULO SUBRASANTE	42,610.00	38,080.00	KPa
DEFLEXIONES CALCULADAS			
Do	134	138	1/100 mm
D25	86	98	1/100 mm
CBR SUBRASANTE	8.7	8.0	%
Módulo semilla SR	59,742.14	56,269.14	KPa

Cuadro 9

RESUMEN DE MODELACIÓN AUTORES
PROYECTO PEREIRA – MARSELLA
PROGRAMA: UNALCAPA

TRAMO	1	2	UNIDAD
DEFLEXIONES MEDIDAS			
Do	53	54	1/1000 plg
D25	34	39	1/1000 plg
MÓDULO CARPETA	19,912.66	19,912.66	psi
ESPELOR CARPETA	2.36	1.57	plg
CONDICIÓN DE LIGA	SI	SI	
MODULO BASE GRANULAR	12,328.20	22,480.84	psi
ESPELOR CAPA GRANULAR	15.35	9.06	plg
CONDICIÓN DE LIGA	NO	NO	
MODULO SUBRASANTE	6,180.06	5,523.04	psi
DEFLEXIONES CALCULADAS			
Do	53	54	1/1000 plg
D25	34	39	1/1000 plg
CBR SUBRASANTE			
Módulo semilla SR	8,664.86	8,161.15	Psi

OBSERVACIONES A LA MODELACIÓN

PEREIRA - MARSELLA

1. La información disponible indicaba la posibilidad de establecer sectores homogéneos menores que la longitud del proyecto. Esto tiene un impacto económico serio.
2. El consultor utiliza los módulos recomendados para modelación con viga Benkelman para una carpeta en mal estado, el cual es de 1400 Kgr/cm². Esto le permite obtener por azar una solución cercana a la correcta, sobre varias premisas falsas.
3. El consultor modela sólo una estructura cuyos espesores no corresponden a los existentes en campo, de acuerdo con su propia información geotécnica, así mismo liga la capa granular con la subrasante, lo cual constituye una presunción optimista sobre la forma como trabaja el modelo mecánico.
4. El consultor modela su estructura con el programa DEPAV, para coincidir con el radio de curvatura y una deflexión de elección no justificada.

5. Menciona la deflexión característica $D_c = 296 \text{ 1/100 mm}$ pero modela con $D_0 = 144.57 \text{ 1/100 mm}$, y un radio de curvatura $R_c = 25.33 \text{ m.}$, con lo cual hallamos una deflexión $D_{25} = 21.24 \text{ 1/100 mm.}$, pareja que no se encuentra en la cartera.
6. Los autores modelan con KENLAYER y UNALCAPA, encontrando los valores objetivo D_0 y D_{25} , correspondientes a valores que realmente existen en la cartera de deflexiones de viga BENKELMAN, y que corresponden a estructuras promedio como se ha previsto para efectos de diseño.
7. Se realizó la modelación con dos (2) estructuras diferentes según se comprobó con la información geotécnica.
8. En el tramo 1 se modela una estructura con espesores superiores a los escogidos por el consultor de acuerdo con la información geotécnica.
9. En el tramo 2 las estructuras son bastante diferentes, pues la estructura promedio del consultor, presenta un espesor mayor en la capa granular, alrededor del 50%; el espesor tomado por los autores fue el encontrado en el informe geotécnico del mismo consultor.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE MODELACIÓN

PEREIRA - MARSELLA

TRAMO 1

MODELACIÓN CONSULTOR

$$\begin{array}{l|l} \hline Eca = 1400.00 \text{ Kgr / cm}^2 & L \quad 5.00 \text{ cm} \\ \hline Ecg = 890.00 \text{ Kgr / cm}^2 & L \quad 35.00 \text{ cm} \\ \hline Esr = 310.00 \text{ Kgr / cm}^2 & \end{array}$$

MODELACIÓN AUTORES

$$\begin{array}{l|l} \hline Eca = 1400.00 \text{ Kgr / cm}^2 & L \quad 6.00 \text{ cm} \\ \hline Ebg = 866.76 \text{ Kgr / cm}^2 & N \quad 39.00 \text{ cm} \\ \hline Esr = 434.50 \text{ Kgr / cm}^2 & \end{array}$$

TRAMO 2

MODELACIÓN CONSULTOR

$$\begin{array}{l|l} \hline Eca = 1400.00 \text{ Kgr / cm}^2 & L \quad 5.00 \text{ cm} \\ \hline Ecg = 890.00 \text{ Kgr / cm}^2 & L \quad 35.00 \text{ cm} \\ \hline Esr = 310.00 \text{ Kgr / cm}^2 & \end{array}$$

MODELACIÓN AUTORES

$$\begin{array}{l|l} \hline Eca = 1400.00 \text{ Kgr / cm}^2 & L \quad 4.00 \text{ cm} \\ \hline Ebg = 1580.56 \text{ Kgr / cm}^2 & N \quad 23.00 \text{ cm} \\ \hline Esr = 388.31 \text{ Kgr / cm}^2 & \end{array}$$

Cuadro 10

RESUMEN DE DISEÑO CONSULTOR
PROYECTO PEREIRA – MARSELLA
PROGRAMA: DEPAV

TRAMO	1	UNIDADES
ESFUERZOS ADMISIBLES		
ϵ_t	7.80×10^{-5}	mm/mm
ϵ_z	7.56×10^{-5}	mm/mm
MÓDULO SOBRECARPETA	15,000.00	Kgr/cm ²
ESPELOR SOBRECARPETA	5.00	cm
CONDICIÓN DE LIGA	SI	
MÓDULO CARPETA	13,000.00	Kgr/cm ²
ESPELOR CARPETA	5.00	cm
CONDICIÓN DE LIGA	SI	
MODULO BASE GRANULAR	890.00	Kgr/cm ²
ESPELOR CAPA GRANULAR	35.00	cm
CONDICIÓN DE LIGA	SI	
MODULO SUBRASANTE	310.00	Kgr/cm ²
ESFUERZOS CALCULADOS		
ϵ_t	5.25×10^{-5}	mm/mm
ϵ_z	1.06×10^{-3}	mm/mm

NOTA: ϵ_z adm mayor que ϵ_z , por lo tanto no cumple.

DISEÑO AUTORES

PEREIRA – MARSELLA TRAMO 1

ANÁLISIS DE LOS ESFUERZOS DE TRABAJO

Selección del riesgo.

RIESGO DE DISEÑO	15%
VARIABLE NORMAL (u)	-1.04

Esfuerzo de trabajo a tensión en parte inferior de la capa asfáltica.

FUNCIÓN	Das & Pandey (India)
f_1	2,657.8721
f_2	3.5650
f_3	1.4747
N (ESAL)	320,000
WMAAT (°C)	
Tmix (°C)	25.0
E _{AC} (KPa)	4,000,000
ϵ_t (mm/mm)	-4.8458E-04

ϵ_t (mm/mm)		-4.8458E-04
k_r		0.81349189
k_c		1.1
k_s		0.833333
ϵ_t (mm/mm) admisible		-3.6135E-04

Esfuerzo de trabajo a compresión en la Parte superior de la subrasante.

Coefficiente A

TPDA Comercial / Carril diseño / Año 1	< 150	> = 150
A	0.016	0.012

Coefficiente Kr

U	-1.04
SN	0.30
C	0.02
$b = -1/f_2$	-0.280505
Sh	1.00
δ	0.308356
k_r	0.813492

Coefficiente Kc

MATERIAL	Base asfáltica	Concreto asfáltico	Concreto asfáltico de alto módulo
k_c	1.3	1.1	1.0

Coefficiente Ks

MÓDULO	E _{SR} < 50,000 KPa	50,000 <= E _{SR} < 120,000 Kpa	E _{SR} >= 120,000 KPa
k_s	0.833333	0.909091	1.0

Subrasante : 435 Kgr. / cm²

A	0.016
N (ESAL)	320,000
ϵ_z (mm/mm) admisible	9.5935E-04

DISEÑO AUTORES

PEREIRA – MARSELLA TRAMO 2

ANÁLISIS DE LOS ESFUERZOS DE TRABAJO

Selección del riesgo.

RIESGO DE DISEÑO	15%
VARIABLE NORMAL (u)	-1.04

Esfuerzo de trabajo a tensión en parte inferior de la capa asfáltica.

FUNCIÓN	Das & Pandey (India)
f_1	2,657.8721
f_2	3.5650
f_3	1.4747
N (ESAL)	320,000
WMAAT (°C)	
Tmix (°C)	25.0
E_{AC} (KPa)	4,000,000
ϵ_t (mm/mm)	-4.8458E-04

ϵ_t (mm/mm)	-4.8458E-04
k_r	0.81349189
k_c	1.1
k_s	0.833333
ϵ_t (mm/mm) admisible	-3.6135E-04

Esfuerzo de trabajo a compresión en la Parte superior de la subrasante.

Coficiente A

TPDA Comercial / Carril diseño / Año 1	< 150	> = 150
A	0.016	0.012

Coficiente Kr

U	-1.04
SN	0.30
C	0.02
$b = -1/f_2$	-0.280505
Sh	1.00
δ	0.308356
k_r	0.813492

Coficiente Kc

MATERIAL	Base asfáltica	Concreto asfáltico	Concreto asfáltico de alto módulo
k_c	1.3	1.1	1.0

Coficiente Ks

MÓDULO	$E_{SR} < 50,000$ KPa	$50,000 \leq E_{SR} < 120,000$ KPa	$E_{SR} \geq 120,000$ KPa
k_s	0.833333	0.909091	1.0

Subrasante : 399 Kgr. / cm²

A	0.016
N (ESAL)	320,000
ϵ_z (mm/mm) admisible	9.5935E-04

Cuadro 11

RESUMEN DE ESFUERZOS ADMISIBLES
PROYECTO: PEREIRA – MARSELLA
MÉTODO EMPÍRICO – MECANICISTA FRANCÉS
ADAPTACIÓN DE ING. LUIS RICARDO VÁSQUEZ V.

TRAMO	1	2	UNIDADES
TRÁNSITO	0.32×10^6	0.32×10^6	ESAL
TEMPERTURA MIX (°C)	25°C	25°C	°C
Eca	4'000.000	4'000.000	KPa
Kr	0.813491	0.813491	
Kc	1.10	1.10	
Ks	1/1.2	1/1.2	
et (DAS Y PANDEY)	4.85×10^{-4}	4.85×10^{-4}	mm/mm
et admisible	3.61×10^{-4}	3.61×10^{-4}	mm/mm
ez admisible	9.59×10^{-4}	9.59×10^{-4}	mm/mm

Cuadro 12

RESUMEN DE DISEÑO AUTORES
PROYECTO: PEREIRA – MARSELLA
PROGRAMA : DEPAV

TRAMO	1	2	UNIDADES
ESFUERZOS ADMISIBLES			
ϵ_t	3.61×10^{-4}	3.61×10^{-4}	mm/mm
ϵ_z	9.59×10^{-4}	9.59×10^{-4}	mm/mm
MÓDULO SOBRECARPETA	40,788.65	40,788.65	Kgr/cm ²
ESPELOR SOBRECARPETA	5.00	5.00	cm
CONDICIÓN DE LIGA	SI	SI	
MÓDULO REFUERZO GRANULAR	4,894.64	4,894.64	Kgr/cm ²
ESPELOR REFUERZO GRANULAR	15.00	15.00	cm
CONDICIÓN DE LIGA	NO	NO	
MÓDULO CARPETA	1,400.00	1,400.00	Kgr/cm ²
ESPELOR CARPETA	6.00	4.00	cm
CONDICIÓN DE LIGA	SI	SI	
MODULO BASE GRANULAR	866.76	1,580.56	Kgr/cm ²
ESPELOR CAPA GRANULAR	39.00	23.00	cm
CONDICIÓN DE LIGA	NO	NO	
MODULO SUBRASANTE	434.50	388.31	Kgr/cm ²
ESFUERZOS CALCULADOS			
ϵ_t	2.05×10^{-4}	2.04×10^{-4}	mm/mm
ϵ_z	1.07×10^{-4}	1.60×10^{-4}	mm/mm

NOTA: Módulo del refuerzo granular obtenido por VÁSQUEZ y VÁSQUEZ (Investigación inédita).

OBSERVACIONES AL DISEÑO

PEREIRA - MARSELLA

1. El consultor utiliza la función de transferencia de la SHELL, para encontrar los esfuerzos admisibles en la estructura, se observan errores crasos en la transcripción de la fórmula. El consultor utiliza un módulo de 13.664.2 Kgr/cm² (1.34 E+9 N/m²), en la función de la SHELL, para encontrar un ϵ_t admisible, pero al chequear el diseño por medio del programa DEPAV utiliza un módulo de 15.000 Kgr / cm². El consultor no da a conocer como halló el módulo de la carpeta asfáltica a utilizar como refuerzo.
2. El consultor utiliza un coeficiente de calaje de 10, valor que corresponde al análisis común del SPDM 3.0 de la SHELL, pero sobre el cual no se ha realizado una investigación particular en Colombia.
3. El consultor es consistente con las características de la estructura que modeló previamente en cuanto a espesores y condiciones de liga de interfaces. Permanece la inexistencia de los espesores planteados.

4. Los autores diseñan dos (2) estructuras, de acuerdo con la variabilidad estructural encontrada en la vía, según la información geotécnica del consultor.

5. Se propone como solución de rehabilitación la construcción de sobrecarpeta sobre un refuerzo granular de quince (15) centímetros de espesor, construido con material con calidad de base, como mecanismo para evitar la reflexión de grietas.

6. La solución planteada por los autores para impedir la reflexión de grietas, es más sencilla de construir, pues se hace mecánicamente, mientras que un parcheo de dimensiones bastante grandes como es lo planteado por el consultor, es muy costoso, pues es un proceso manual.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE DISEÑO

PEREIRA - MARSELLA

TRAMO 1

DISEÑO CONSULTOR

<u>(MDC2) Eca = 15000.00 Kgr / cm²</u>	L	5.00 cm
<u>(C.A.) Eca = 13000.00 Kgr / cm²</u>	L	5.00 cm
<u>(C.G.) Ecg = 890.00 Kgr / cm²</u>	L	35.00 cm
<u>(S.R.) Esr = 310.00 Kgr / cm²</u>		

DISEÑO AUTORES

<u>(C.A.) Eca = 40788.65 Kgr / cm²</u>	L	5.00 cm
<u>(R.G.) Ebg = 4894.64 Kgr / cm²</u>	N	15.00 cm
<u>(C.A.) Eca = 1400.00 Kgr / cm²</u>	L	6.00 cm
<u>(B.G.) Ebg = 866.76 Kgr / cm²</u>	N	39.00 cm
<u>(S.R.) Esr = 434.50 Kgr / cm²</u>		

TRAMO 2

DISEÑO CONSULTOR

<u>(MDC2) Eca = 15000.00 Kgr / cm²</u>	L	5.00 cm
<u>(C.A.) Eca = 13000.00 Kgr / cm²</u>	L	5.00 cm
<u>(C.G.) Ecg = 890.00 Kgr / cm²</u>	L	35.00 cm
<u>(S.R.) Esr = 310.00 Kgr / cm²</u>		

DISEÑO AUTORES

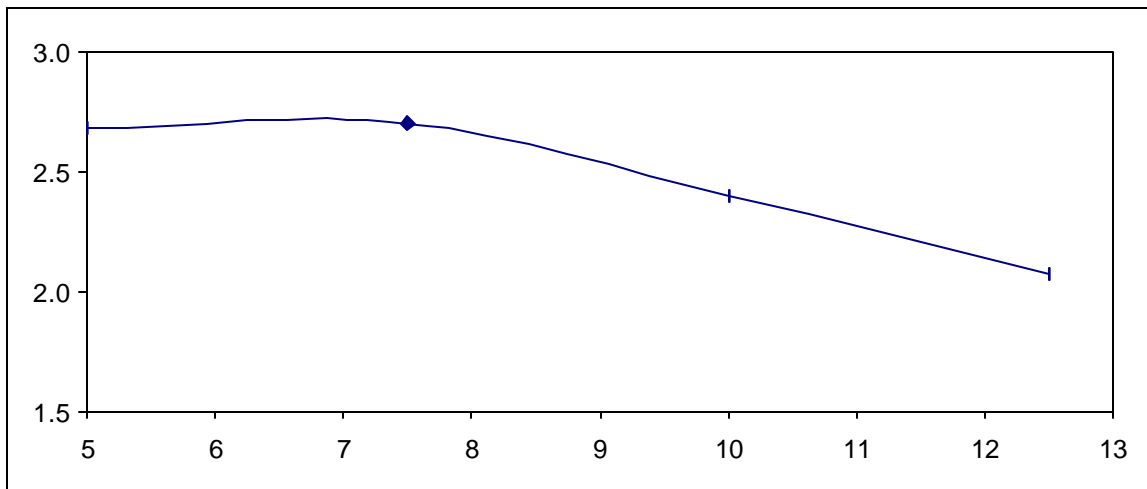
<u>(C.A.) Eca = 40788.65 Kgr / cm²</u>	L	5.00 cm
<u>(R.G.) Ebg = 4894.64 Kgr / cm²</u>	N	15.00 cm
<u>(C.A.) Eca = 1400.00 Kgr / cm²</u>	L	4.00 cm
<u>(B.G.) Ebg = 1580.56 Kgr / cm²</u>	N	23.00 cm
<u>(S.R.) Esr = 388.31 Kgr / cm²</u>		

Mediante los siguientes gráficos, se establece que el espesor de 5.0 cm de sobrecarpeta es apropiado dentro del modelo multicapa elástico.

et vrs Espesor sobrecarpeta

**PEREIRA – MARSELLA
TRAMO 1**

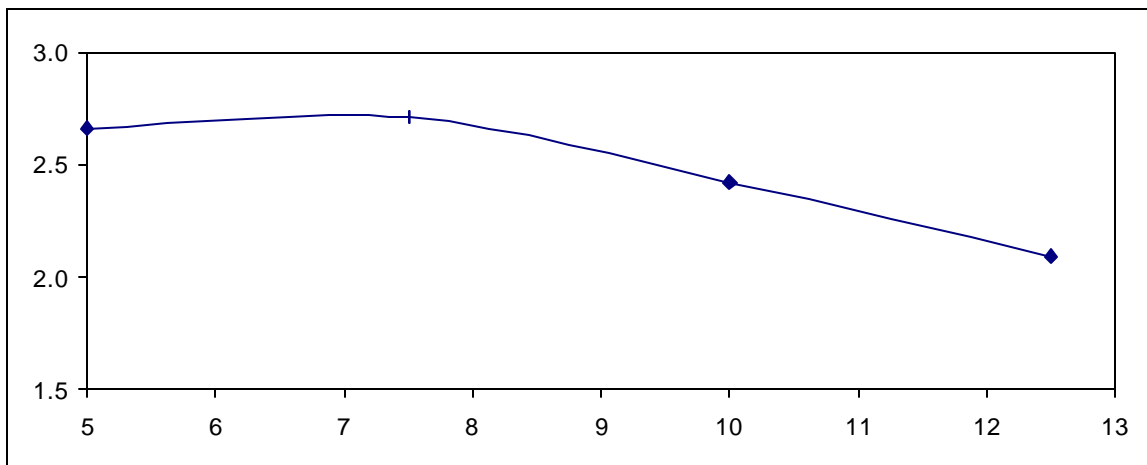
et (mm/mm x 10⁻⁴)



Espesor sobrecarpeta (cm).

TRAMO 2

et (mm/mm x 10⁻⁴)



Espesor sobrecarpeta (cm).

FIGURA 3

3.2 PROYECTO CERRITOS – CAUYÁ

Cuadro 13

RESUMEN DE MODELACIÓN CONSULTOR

PROYECTO: CERRITOS – CAUYÁ

TRAMO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	UNIDADES
DEFLEXIONES DEPAV										
Do	26	23	19	26	26	22	22	21	24	1/1000 pulg.
RADIO DE CURVATURA Rc	65	129	108	73	67	85	70	71	68	m
MÓDULO CARPETA	34,847.19	312,913.60	66,849.71	78,228.00	36,980.69	102,408.10	36,980.69	57,604.54	38,829.73	psi
ESPESOR CARPETA	7.09	3.94	7.87	3.94	7.87	3.94	7.87	3.94	5.91	Pulg.
CONDICIÓN DE LIGA	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	
MÓDULO CAPA GRANULAR	22,757.35	25,602.02	24,179.68	22,757.35	21,335.01	24,179.68	22,757.35	24,179.68	21,335.01	psi
ESPESOR CAPA GRANULAR	21.65	23.62	15.75	19.69	11.81	27.56	31.50	35.43	27.56	Pulg.
CONDICIÓN DE LIGA	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	
MÓDULO SUBRASANTE	6,827.20	6,542.74	11,378.67	6,684.97	8,676.24	8,534.01	7,111.67	8,249.54	7,822.84	psi
DEFLEXIONES UNALCAPA										
Do	26	23	19	27	26	23	23	22	25	1/1000 plg
D25	18	18	14	18	19	15	16	14	17	1/1000 plg
RADIO BENKELMAN	154	246	246	137	176	154	176	154	154	m.
CBR SUBRASANTE										
Módulo semilla SR	3,033.06	4,336.74		6,000.28		3,140.58		7,190.55		psi

Nota: La deflexión Do y el radio de curvatura Rc, son tomados de los resultados en DEPAV.

Nota 2 : El radio de curvatura en UNALCAPA es calculado, $Rc=3125 / (D_0-D_{25})$. D en mm.

Cuadro 14

**RESUMEN DE MODELACIÓN AUTORES
PROYECTO: CERRITOS – CAUYÁ
PROGRAMA: KENLAYER**

TRAMO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	UNIDADES
DEFLEXIONES DEPAV										
Do	26	23	19	26	26	22	22	21	24	1/1000 pulg.
RADIO DE CURVATURA Rc	65	129	108	73	67	85	70	71	68	m
MÓDULO CARPETA	34,847.19	312,913.60	66,849.71	78,228.00	36,980.69	102,408.10	36,980.69	57,604.54	38,829.73	psi
ESPESOR CARPETA	7.09	3.94	7.87	3.94	7.87	3.94	7.87	3.94	5.91	Pulg.
CONDICIÓN DE LIGA	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	
MÓDULO CAPA GRANULAR	22,757.35	25,602.02	24,179.68	22,757.35	21,335.01	24,179.68	22,757.35	24,179.68	21,335.01	psi
ESPESOR CAPA GRANULAR	21.65	23.62	15.75	19.69	11.81	27.56	31.50	35.43	27.56	Pulg.
CONDICIÓN DE LIGA	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	
MÓDULO SUBRASANTE	6,827.20	6,542.74	11,378.67	6,684.97	8,676.24	8,534.01	7,111.67	8,249.54	7,822.84	psi
DEFLEXIONES UNALCAPA										
Do	26	23	19	27	26	23	23	22	25	1/1000 plg
D25	18	18	14	18	19	15	16	14	17	1/1000 plg
RADIO BENKELMAN	154	246	246	137	176	154	176	154	154	m.
CBR SUBRASANTE										
Módulo semilla SR	3,033.06	4,336.74		6,000.28		3,140.58		7,190.55		psi

NOTA: La modelación del tramo No 9, arroja que la condición de la carpeta con la capa granular es NO ligada.

Cuadro 15

RESUMEN DE MODELACIÓN AUTORES
PROYECTO: CERRITOS – CAUYÁ
PROGRAMA: UNALCAPA

TRAMO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	UNIDADES
DEFLEXIONES MEDIDAS										
Do	14	13	17	18	15	14	17	15	14	1/1000 plg
D25	6	9	10	11	7	8	8	9	6	1/1000 pulg.
MÓDULO CARPETA										
MÓDULO CARPETA	19,913.68	19,913.68	19,913.68	19,913.68	19,913.68	19,913.68	19,913.68	19,913.68	19,913.68	psi
ESPESOR CARPETA	7.09	3.94	7.87	3.94	7.87	3.94	7.87	3.94	5.91	Pulg.
CONDICIÓN DE LIGA	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	
MÓDULO CAPA BASE										
MÓDULO CAPA BASE	50,763.20	62,801.32	67,007.42	35,534.24	53,663.95	36,259.43	36,259.43	40,610.56	55,114.33	psi
ESPESOR CAPA BASE	15.75	23.62	15.75	11.81	5.91	27.56	15.75	15.75	27.56	Pulg.
CONDICIÓN DE LIGA	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	
MÓDULO CAPA SUBBASE										
MÓDULO CAPA SUBBASE	36,259.43			29,007.54	41,335.74		33,358.67	37,709.80		psi
ESPESOR CAPA SUBBASE	5.91			7.87	5.91		15.75	19.68		Pulg.
CONDICIÓN DE LIGA	NO			NO	NO		NO	NO		
MÓDULO SUBRASANTE										
MÓDULO SUBRASANTE	29,007.54	13,778.58	13,807.59	23,931.22	39,160.18	27,557.16	31,908.29	27,557.16	42,060.93	psi
DEFLEXIONES CALCULADAS										
Do	14	13	17	18	15	14	16	14	14	1/1000 plg
D25	7	9	10	11	7	8	8	9	6	1/1000 pulg.
CBR SUBRASANTE										
Módulo semilla SR	3,033.06	4,336.74		6,000.28		3,140.58		7,190.55		psi

NOTA: La modelación del tramo No 9, arroja que la condición de la carpeta con la capa granular es NO ligada.

OBSERVACIONES A LA MODELACIÓN

CERRITOS -CAUYÁ

1. El consultor, contrario a lo que él mismo plantea, no utiliza los módulos de concreto asfáltico propios para modelación con viga Benkelman. Por el contrario usa módulos diferentes aún para carpetas con iguales condiciones de daño, de acuerdo con su informe. Hay que resaltar que llega a utilizar módulos hasta de 22,000 Kgr/cm², muy superior a los 13,000 Kgr/cm², máximo valor recomendado para carpetas en buen estado.
2. El hecho de utilizar módulos de carpeta asfáltica diferentes a los recomendados para modelación con viga BENKELMAN, hace que no se confíe en la modelación y por ende en el diseño de refuerzo basado en ella.
3. El consultor modela con DEPAV; tres (3) capas, carpeta, capa granular y subrasante, y su objeto aparente de modelación es la deflexión característica Dc.

4. Los autores modelan con KENLAYER y UNALCAPA; tres (3) o cuatro (4) capas, para una mayor aproximación al comportamiento de la estructura, encontrando los valores buscados D_0 y D_{25} , sin necesidad de artificios como utilizar módulos de la carpeta asfáltica ajenos a las condiciones del ensayo de viga Benkelman.

5. La condición de liga de la carpeta asfáltica con la capa granular de la estructura del tramo 9, se debió tomar como no ligada de acuerdo con la evolución del retrocálculo. En campo debería establecerse la presencia de fenómenos tales como la ausencia de riego de liga o, la presencia de agua en la interface que pueden explicar este comportamiento.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE MODELACIÓN

CERRITOS – CAUYÁ

TRAMO 1

MODELACIÓN CONSULTOR

$Eca = 2450 \text{ Kgr / cm}^2$	L	18 cm
$Ecg = 1600 \text{ Kgr / cm}^2$	L	55 cm
$Esr = 480 \text{ Kgr / cm}^2$		

MODELACIÓN AUTORES

$Eca = 1400.00 \text{ Kgr / cm}^2$	L	18 cm
$Ebg = 3569.00 \text{ Kgr / cm}^2$	N	40 cm
$Esg = 2549.29 \text{ Kgr / cm}^2$	N	15 cm
$Esr = 2039.43 \text{ Kgr / cm}^2$		

TRAMO 2

MODELACIÓN CONSULTOR

$Eca = 22000 \text{ Kgr / cm}^2$	L	10 cm
$Ecg = 1800 \text{ Kgr / cm}^2$	L	60 cm
$Esr = 460 \text{ Kgr / cm}^2$		

MODELACIÓN AUTORES

$Eca = 1400.00 \text{ Kgr / cm}^2$	L	10 cm
$Ebg = 4415.37 \text{ Kgr / cm}^2$	N	60 cm
$Esg = 968.73 \text{ Kgr / cm}^2$		

TRAMO 3

MODELACIÓN CONSULTOR

$Eca = 4700 \text{ Kgr / cm}^2$	L	20 cm
$Ecg = 1700 \text{ Kgr / cm}^2$	L	40 cm
$Esr = 800 \text{ Kgr / cm}^2$		

MODELACIÓN AUTORES

$Eca = 1400.00 \text{ Kgr / cm}^2$	L	20 cm
$Ebg = 4711.09 \text{ Kgr / cm}^2$	N	40 cm
$Esg = 970.77 \text{ Kgr / cm}^2$		

TRAMO 4

MODELACIÓN CONSULTOR

$Eca = 5500 \text{ Kgr / cm}^2$	L	10 cm
$Ecg = 1600 \text{ Kgr / cm}^2$	L	50 cm
$Esr = 470 \text{ Kgr / cm}^2$		

MODELACIÓN AUTORES

$Eca = 1400.00 \text{ Kgr / cm}^2$	L	10 cm
$Ebg = 2498.30 \text{ Kgr / cm}^2$	N	30 cm
$Esg = 2039.43 \text{ Kgr / cm}^2$	N	20 cm
$Esr = 1682.43 \text{ Kgr / cm}^2$		

TRAMO 5

MODELACIÓN CONSULTOR

$Eca = 2600 \text{ Kgr / cm}^2$	L	20 cm
$Ecg = 1500 \text{ Kgr / cm}^2$	L	30 cm
$Esr = 610 \text{ Kgr / cm}^2$		

MODELACIÓN AUTORES

$Eca = 1400.00 \text{ Kgr / cm}^2$	L	20 cm
$Ebg = 3772.95 \text{ Kgr / cm}^2$	N	15 cm
$Esg = 2906.19 \text{ Kgr / cm}^2$	N	15 cm
$Esr = 2753.23 \text{ Kgr / cm}^2$		

TRAMO 6

MODELACIÓN CONSULTOR

$Eca = 7200 \text{ Kgr / cm}^2$	L	10 cm
$Ecg = 1700 \text{ Kgr / cm}^2$	L	70 cm
$Esr = 600 \text{ Kgr / cm}^2$		

MODELACIÓN AUTORES

$Eca = 1400.00 \text{ Kgr / cm}^2$	L	10 cm
$Ebg = 2549.29 \text{ Kgr / cm}^2$	N	70 cm
$Esg = 1937.46 \text{ Kgr / cm}^2$		

TRAMO 7

MODELACIÓN CONSULTOR

$Eca = 2600 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$	L	20 cm
$Ecg = 1600 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$	L	80 cm
$Esr = 500 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$		

MODELACIÓN AUTORES

$Eca = 1400.00 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$	L	20 cm
$Ebg = 2549.29 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$	N	40 cm
$Esg = 2345.35 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$	N	40 cm
$Esr = 2243.38 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$		

TRAMO 8

MODELACIÓN CONSULTOR

$Eca = 4050 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$	L	10 cm
$Ecg = 1700 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$	L	90 cm
$Esr = 580 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$		

MODELACIÓN AUTORES

$Eca = 1400.00 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$	L	10 cm
$Ebg = 2855.20 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$	N	40 cm
$Esg = 2651.26 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$	N	50 cm
$Esr = 1937.46 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$		

TRAMO 9

MODELACIÓN CONSULTOR

$Eca = 2730 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$	L	15 cm
$Ecg = 1500 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$	L	70 cm
$Esr = 550 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$		

MODELACIÓN AUTORES

$Eca = 1400.00 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$	N	15 cm
$Ebg = 3874.92 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$	N	70 cm
$Esg = 2957.18 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$		

Nota: La condición de no liga entre carpeta y base granular se deduce por la modelación

Cuadro 16

RESUMEN DE DISEÑO CONSULTOR ALTERNATIVA 1
PROYECTO: CERRITOS – CAUYÁ
MÉTODO: AASHTO

TRAMO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	UNIDADES
SN MÍNIMO	4.51	4.58	3.82	4.55	4.19	5.05	5.39	6.03	6.08	
MÓDULO CARPETA	30,000.00	30,000.00	30,000.00	30,000.00	30,000.00	30,000.00	30,000.00	30,000.00	30,000.00	Kgr/cm ²
ESPESOR CARPETA	7.00	7.00	7.00	7.00	10.00	7.00	7.00	7.00	7.00	cm
CONDICIÓN DE LIGA	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	
MÓDULO BASE GRANULAR	4,500.00	4,500.00	4,500.00	4,500.00	4,500.00	4,500.00	4,500.00	4,500.00	4,500.00	Kgr/cm ²
ESPESOR BASE GRANULAR	17.00	10.00	16.00	22.00	23.00	8.00	8.00	8.00	8.00	cm
CONDICIÓN DE LIGA	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	
MÓDULO GRANULAR EXISTENTE	1,600.00	1,800.00	1,700.00	1,600.00	1,500.00	1,700.00	1,600.00	1,700.00	2,730.00	Kgr/cm ²
ESPESOR GRANULAR EXISTENTE	55.00	60.00	40.00	50.00	30.00	70.00	80.00	90.00	70.00	cm
CONDICIÓN DE LIGA	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	
MÓDULO SUBRASANTE	480.00	460.00	800.00	470.00	610.00	600.00	500.00	580.00	550.00	Kgr/cm ²
SN CALCULADO	4.51	4.58	3.82	4.55	4.19	5.05	5.39	6.03	6.08	
SN AUTORES	4.97	5.04	4.16	5.00	4.58	4.61	4.90	4.66	4.75	
CONDICIONES ESTUDIO										

NOTA: La base granular se prepara con material de reciclaje de la carpeta asfáltica + Base granular tipo MOPT/INVIAS

NOTA2: Para el cálculo del SN, los autores toman Mr, W₁₈, Zr, del consultor, So=0.49 por AASHTO y ΔPSI= 1.7 (4.2 - 2.5) por ser una troncal.

Cuadro 17

RESUMEN DE DISEÑO CONSULTOR ALTERNATIVA 2
PROYECTO: CERRITOS – CAUYÁ
MÉTODO: AASHTO

TRAMO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	UNIDADES
SN MÍNIMO	4.96	5.12	4.41	3.09	3.8	5.5	5.84	6.49	5.42	
MÓDULO CARPETA MDC-2	30,000.00	30,000.00	30,000.00	30,000.00	30,000.00	30,000.00	30,000.00	30,000.00	30,000.00	Kgr/cm ²
ESPELOR CARPETA	7.00	7.00	7.00	10.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	cm
CONDICIÓN DE LIGA	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	
MÓDULO CARPETA MAC-2	22,000.00	22,000.00	22,000.00	22,000.00	22,000.00	22,000.00	22,000.00	22,000.00	22,000.00	Kgr/cm ²
ESPELOR CARPETA	8.00	8.00	8.00	15.00	8.00	8.00	8.00	8.00	7.00	cm
CONDICIÓN DE LIGA	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	
MÓDULO CARPETA EXISTENTE	2,450.00	22,000.00	4,700.00	5,500.00	2,600.00	7,200.00	2,600.00	4,050.00	2,730.00	Kgr/cm ²
ESPELOR CARPETA	18.00	10.00	20.00	10.00	20.00	10.00	10.00	10.00	8.00	cm
CONDICIÓN DE LIGA	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	
MÓDULO GRANULAR EXISTENTE	1,600.00	1,800.00	1,700.00	1,600.00	1,500.00	1,700.00	1,600.00	1,700.00	1,500.00	Kgr/cm ²
ESPELOR GRANULAR EXISTENTE	55.00	60.00	40.00	50.00	30.00	70.00	80.00	90.00	70.00	cm
CONDICIÓN DE LIGA	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	
MÓDULO SUBRASANTE	480.00	460.00	800.00	470.00	610.00	600.00	500.00	580.00	550.00	Kgr/cm ²
SN CALCULADO	4.96	5.12	4.41	3.09	3.80	5.50	5.84	6.49	5.42	
SN AUTORES CONDICIONES ESTUDIO	4.97	5.04	4.16	5.00	4.58	4.61	4.90	4.66	4.75	

NOTA2: Para el cálculo del SN, los autores toman Mr, W₁₈, Zr, del consultor, So=0.49 por AASHTO y ΔPSI= 1.7 (4.2 - 2.5) por ser una troncal.

DISEÑO AUTORES

CERRITOS – CAUYÁ TRAMO 1

ANÁLISIS DE LOS ESFUERZOS DE TRABAJO

Selección del riesgo.

RIESGO DE DISEÑO	15%
VARIABLE NORMAL (u)	-1.04

Esfuerzo de trabajo a tensión en parte inferior de la capa asfáltica.

FUNCIÓN	Das & Pandey (India)
f_1	2,657.8721
f_2	3.5650
f_3	1.4747
N (ESAL)	7,200,000
WMAAT (°C)	
T_{mix} (°C)	35.0
E_{AC} (KPa)	1,500,000
ϵ_t (mm/mm)	-3.0358E-04

ϵ_t (mm/mm)		-3.0358E-04
k_r		0.81349189
k_c		1.1
k_s		1.000000
ϵ_t (mm/mm) admisible		-2.7166E-04

Esfuerzo de trabajo a compresión en la Parte superior de la subrasante.

Coefficiente A

TPDA Comercial / Carril diseño / Año 1	< 150	> = 150
A	0.016	0.012

Coefficiente Kr

U	-1.04
SN	0.30
C	0.02
$b = -1/f_2$	-0.280505
Sh	1.00
δ	0.308356
k_r	0.813492

Coefficiente Kc

MATERIAL	Base asfáltica	Concreto asfáltico	Concreto asfáltico de alto módulo
k_c	1.3	1.1	1.0

Coefficiente Ks

MÓDULO	$E_{SR} < 50,000$ KPa	$50,000 \leq E_{SR} < 120,000$ KPa	$E_{SR} \geq 120,000$ KPa
k_s	0.833333	0.909091	1.0

Subrasante : 2039 Kgr. / cm²

A	0.016
N (ESAL)	7,200,000
ϵ_z (mm/mm) admisible	4.8061E-04

DISEÑO AUTORES

CERRITOS – CAUYÁ TRAMO 2

ANÁLISIS DE LOS ESFUERZOS DE TRABAJO

Selección del riesgo.

RIESGO DE DISEÑO	15%
VARIABLE NORMAL (u)	-1.04

Esfuerzo de trabajo a tensión en parte inferior de la capa asfáltica.

FUNCIÓN	Das & Pandey (India)
f_1	2,657.8721
f_2	3.5650
f_3	1.4747
N (ESAL)	7,200,000
WMAAT (°C)	
Tmix (°C)	35.0
E_{AC} (KPa)	1,500,000
ϵ_t (mm/mm)	-3.0358E-04

ϵ_t (mm/mm)		-3.0358E-04
k_r		0.81349189
k_c		1.1
k_s		0.909091
ϵ_t (mm/mm) admisible		-2.4696E-04

Esfuerzo de trabajo a compresión en la Parte superior de la subrasante.

Coefficiente A

TPDA Comercial / Carril diseño / Año 1	< 150	> = 150
A	0.016	0.012

Coefficiente Kr

U	-1.04
SN	0.30
C	0.02
$b = -1/f_2$	-0.280505
Sh	1.00
δ	0.308356
k_r	0.813492

Coefficiente Kc

MATERIAL	Base asfáltica	Concreto asfáltico	Concreto asfáltico de alto módulo
k_c	1.3	1.1	1.0

Coefficiente Ks

MÓDULO	$E_{SR} < 50,000$ KPa	$50,000 \leq E_{SR} < 120,000$ KPa	$E_{SR} \geq 120,000$ KPa
k_s	0.833333	0.909091	1.0

Subrasante : 969 Kgr. / cm²

A	0.016
N (ESAL)	7,200,000
ϵ_z (mm/mm) admisible	4.8061E-04

DISEÑO AUTORES

CERRITOS – CAUYÁ TRAMO 3

ANÁLISIS DE LOS ESFUERZOS DE TRABAJO

Selección del riesgo.

RIESGO DE DISEÑO	15%
VARIABLE NORMAL (u)	-1.04

Esfuerzo de trabajo a tensión en parte inferior de la capa asfáltica.

FUNCIÓN	Das & Pandey (India)
f_1	2,657.8721
f_2	3.5650
f_3	1.4747
N (ESAL)	7,200,000
WMAAT (°C)	
Tmix (°C)	35.0
E _{AC} (KPa)	1,500,000
et (mm/mm)	-3.0358E-04

et (mm/mm)	-3.0358E-04
kr	0.81349189
kc	1.1
ks	0.909091
et (mm/mm) admisible	-2.4696E-04

Esfuerzo de trabajo a compresión en la Parte superior de la subrasante.

Coefficiente A

TPDA Comercial / Carril diseño / Año 1	< 150	> = 150
A	0.016	0.012

Coefficiente Kr

U	-1.04
SN	0.30
C	0.02
$b = -1/f_2$	-0.280505
Sh	1.00
δ	0.308356
k_r	0.813492

Coefficiente Kc

MATERIAL	Base asfáltica	Concreto asfáltico	Concreto asfáltico de alto módulo
k_c	1.3	1.1	1.0

Coefficiente Ks

MÓDULO	E _{SR} < 50,000 KPa	50,000 <= E _{SR} < 120,000 KPa	E _{SR} >= 120,000 KPa
k_s	0.833333	0.909091	1.0

Subrasante : 971 Kgr. / cm²

A	0.016
N (ESAL)	7,200,000
ez (mm/mm) admisible	4.8061E-04

DISEÑO AUTORES

CERRITOS – CAUYÁ TRAMO 4

ANÁLISIS DE LOS ESFUERZOS DE TRABAJO

Selección del riesgo.

RIESGO DE DISEÑO	15%
VARIABLE NORMAL (u)	-1.04

Esfuerzo de trabajo a tensión en parte inferior de la capa asfáltica.

FUNCIÓN	Das & Pandey (India)
f_1	2,657.8721
f_2	3.5650
f_3	1.4747
N (ESAL)	7,200,000
WMAAT (°C)	
Tmix (°C)	35.0
E_{AC} (KPa)	1,500,000
ϵ_t (mm/mm)	-3.0358E-04

ϵ_t (mm/mm)	-3.0358E-04
k_r	0.81349189
k_c	1.1
k_s	1.000000
ϵ_t (mm/mm) admisible	-2.7166E-04

Esfuerzo de trabajo a compresión en la Parte superior de la subrasante.

Coefficiente A

TPDA Comercial / Carril diseño / Año 1	< 150	> = 150
A	0.016	0.012

Coefficiente Kr

U	-1.04
SN	0.30
C	0.02
$b = -1/f_2$	-0.280505
Sh	1.00
δ	0.308356
k_r	0.813492

Coefficiente Kc

MATERIAL	Base asfáltica	Concreto asfáltico	Concreto asfáltico de alto módulo
k_c	1.3	1.1	1.0

Coefficiente Ks

MÓDULO	$E_{SR} < 50,000$ KPa	$50,000 \leq E_{SR} < 120,000$ KPa	$E_{SR} \geq 120,000$ KPa
k_s	0.833333	0.909091	1.0

Subrasante : 1683 Kgr. / cm²

A	0.016
N (ESAL)	7,200,000
ϵ_z (mm/mm) admisible	4.8061E-04

DISEÑO AUTORES

CERRITOS – CAUYÁ TRAMO 5

ANÁLISIS DE LOS ESFUERZOS DE TRABAJO

Selección del riesgo.

RIESGO DE DISEÑO	15%
VARIABLE NORMAL (u)	-1.04

Esfuerzo de trabajo a tensión en parte inferior de la capa asfáltica.

FUNCIÓN	Das & Pandey (India)
f_1	2,657.8721
f_2	3.5650
f_3	1.4747
N (ESAL)	7,200,000
WMAAT (°C)	
Tmix (°C)	35.0
E_{AC} (KPa)	1,500,000
ϵ_t (mm/mm)	-3.0358E-04

ϵ_t (mm/mm)	-3.0358E-04
k_r	0.81349189
k_c	1.1
k_s	1.000000
ϵ_t (mm/mm) admisible	-2.7166E-04

Esfuerzo de trabajo a compresión en la Parte superior de la subrasante.

Coefficiente A

TPDA Comercial / Carril diseño / Año 1	< 150	> = 150
A	0.016	0.012

Coefficiente Kr

U	-1.04
SN	0.30
C	0.02
$b = -1/f_2$	-0.280505
Sh	1.00
δ	0.308356
k_r	0.813492

Coefficiente Kc

MATERIAL	Base asfáltica	Concreto asfáltico	Concreto asfáltico de alto módulo
k_c	1.3	1.1	1.0

Coefficiente Ks

MÓDULO	$E_{SR} < 50,000$ KPa	$50,000 \leq E_{SR} < 120,000$ KPa	$E_{SR} \geq 120,000$ KPa
k_s	0.833333	0.909091	1.0

Subrasante : 2753 Kgr. / cm²

A	0.016
N (ESAL)	7,200,000
ϵ_z (mm/mm) admisible	4.8061E-04

DISEÑO AUTORES

CERRITOS – CAUYÁ TRAMO 6

ANÁLISIS DE LOS ESFUERZOS DE TRABAJO

Selección del riesgo.

RIESGO DE DISEÑO	15%
VARIABLE NORMAL (u)	-1.04

Esfuerzo de trabajo a tensión en parte inferior de la capa asfáltica.

FUNCIÓN	Das & Pandey (India)
f_1	2,657.8721
f_2	3.5650
f_3	1.4747
N (ESAL)	7,200,000
WMAAT (°C)	
Tmix (°C)	35.0
E_{AC} (KPa)	1,500,000
ϵ_t (mm/mm)	-3.0358E-04

ϵ_t (mm/mm)		-3.0358E-04
k_r		0.81349189
k_c		1.1
k_s		1.000000
ϵ_t (mm/mm) admisible		-2.7166E-04

Esfuerzo de trabajo a compresión en la Parte superior de la subrasante.

Coefficiente A

TPDA Comercial / Carril diseño / Año 1	< 150	> = 150
A	0.016	0.012

Coefficiente Kr

U	-1.04
SN	0.30
C	0.02
$b = -1/f_2$	-0.280505
Sh	1.00
δ	0.308356
k_r	0.813492

Coefficiente Kc

MATERIAL	Base asfáltica	Concreto asfáltico	Concreto asfáltico de alto módulo
k_c	1.3	1.1	1.0

Coefficiente Ks

MÓDULO	$E_{SR} < 50,000$ KPa	$50,000 \leq E_{SR} < 120,000$ KPa	$E_{SR} \geq 120,000$ KPa
k_s	0.833333	0.909091	1.0

Subrasante : 1937 Kgr. / cm²

A	0.016
N (ESAL)	7,200,000
ϵ_z (mm/mm) admisible	4.8061E-04

DISEÑO AUTORES

CERRITOS – CAUYÁ TRAMO 7

ANÁLISIS DE LOS ESFUERZOS DE TRABAJO

Selección del riesgo.

RIESGO DE DISEÑO	15%
VARIABLE NORMAL (u)	-1.04

Esfuerzo de trabajo a tensión en parte inferior de la capa asfáltica.

FUNCIÓN	Das & Pandey (India)
f_1	2,657.8721
f_2	3.5650
f_3	1.4747
N (ESAL)	7,200,000
WMAAT (°C)	
Tmix (°C)	35.0
E_{AC} (KPa)	1,500,000
ϵt (mm/mm)	-3.0358E-04

ϵt (mm/mm)	-3.0358E-04
k_r	0.81349189
k_c	1.1
k_s	1.000000
ϵt (mm/mm) admisible	-2.7166E-04

Esfuerzo de trabajo a compresión en la Parte superior de la subrasante.

Coefficiente A

TPDA Comercial / Carril diseño / Año 1	< 150	> = 150
A	0.016	0.012

Coefficiente Kr

U	-1.04
SN	0.30
C	0.02
$b = -1/f_2$	-0.280505
Sh	1.00
δ	0.308356
k_r	0.813492

Coefficiente Kc

MATERIAL	Base asfáltica	Concreto asfáltico	Concreto asfáltico de alto módulo
k_c	1.3	1.1	1.0

Coefficiente Ks

MÓDULO	$E_{SR} < 50,000$ KPa	$50,000 \leq E_{SR} < 120,000$ KPa	$E_{SR} \geq 120,000$ KPa
k_s	0.833333	0.909091	1.0

Subrasante : 2243 Kgr. / cm²

A	0.016
N (ESAL)	7,200,000
ϵz (mm/mm) admisible	4.8061E-04

DISEÑO AUTORES

CERRITOS – CAUYÁ TRAMO 8

ANÁLISIS DE LOS ESFUERZOS DE TRABAJO

Selección del riesgo.

RIESGO DE DISEÑO	15%
VARIABLE NORMAL (u)	-1.04

Esfuerzo de trabajo a tensión en parte inferior de la capa asfáltica.

FUNCIÓN	Das & Pandey (India)
f_1	2,657.8721
f_2	3.5650
f_3	1.4747
N (ESAL)	7,200,000
WMAAT (°C)	
Tmix (°C)	35.0
E_{AC} (KPa)	1,500,000
ϵt (mm/mm)	-3.0358E-04

ϵt (mm/mm)		-3.0358E-04
k_r		0.81349189
k_c		1.1
k_s		1.000000
ϵt (mm/mm) admisible		-2.7166E-04

Esfuerzo de trabajo a compresión en la Parte superior de la subrasante.

Coefficiente A

TPDA Comercial / Carril diseño / Año 1	< 150	> = 150
A	0.016	0.012

Coefficiente Kr

U	-1.04
SN	0.30
C	0.02
$b = -1/f_2$	-0.280505
Sh	1.00
δ	0.308356
k_r	0.813492

Coefficiente Kc

MATERIAL	Base asfáltica	Concreto asfáltico	Concreto asfáltico de alto módulo
k_c	1.3	1.1	1.0

Coefficiente Ks

MÓDULO	$E_{SR} < 50,000$ KPa	$50,000 \leq E_{SR} < 120,000$ KPa	$E_{SR} \geq 120,000$ KPa
k_s	0.833333	0.909091	1.0

Subrasante : 1937 Kgr. / cm²

A	0.016
N (ESAL)	7,200,000
ϵz (mm/mm) admisible	4.8061E-04

DISEÑO AUTORES

CERRITOS – CAUYÁ TRAMO 9

ANÁLISIS DE LOS ESFUERZOS DE TRABAJO

Selección del riesgo.

RIESGO DE DISEÑO	15%
VARIABLE NORMAL (u)	-1.04

Esfuerzo de trabajo a tensión en parte inferior de la capa asfáltica.

FUNCIÓN	Das & Pandey (India)
f_1	2,657.8721
f_2	3.5650
f_3	1.4747
N (ESAL)	7,200,000
WMAAT (°C)	
Tmix (°C)	35.0
E_{AC} (KPa)	1,500,000
ϵ_t (mm/mm)	-3.0358E-04

ϵ_t (mm/mm)		-3.0358E-04
k_r		0.81349189
k_c		1.1
k_s		1.000000
ϵ_t (mm/mm) admisible		-2.7166E-04

Esfuerzo de trabajo a compresión en la Parte superior de la subrasante.

Coefficiente A

TPDA Comercial / Carril diseño / Año 1	< 150	> = 150
A	0.016	0.012

Coefficiente Kr

U	-1.04
SN	0.30
C	0.02
$b = -1/f_2$	-0.280505
Sh	1.00
δ	0.308356
k_r	0.813492

Coefficiente Kc

MATERIAL	Base asfáltica	Concreto asfáltico	Concreto asfáltico de alto módulo
k_c	1.3	1.1	1.0

Coefficiente Ks

MÓDULO	$E_{SR} < 50,000$ KPa	$50,000 \leq E_{SR} < 120,000$ KPa	$E_{SR} \geq 120,000$ KPa
k_s	0.833333	0.909091	1.0

Subrasante : 2957 Kgr. / cm²

A	0.016
N (ESAL)	7,200,000
ϵ_z (mm/mm) admisible	4.8061E-04

Cuadro 18

RESUMEN DE ESFUERZOS ADMISIBLES
PROYECTO: CERRITOS – CAUYÁ
MÉTODO EMPÍRICO – MECANICISTA FRANCÉS
ADAPTACIÓN ING. LUIS RICARDO VÁSQUEZ V.

TRAMO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	UNIDADES
TRÁNSITO	7.2×10^6	7.2×10^6	7.2×10^6	7.2×10^6	7.2×10^6	7.2×10^6	7.2×10^6	7.2×10^6	7.2×10^6	ESAL
TEMPERATURA MIX (°C)	35°C	35°C	35°C	35°C	35°C	35°C	35°C	35°C	35°C	°C
Eca	1'500.000	1'500.000	1'500.000	1'500.000	1'500.000	1'500.000	1'500.000	1'500.000	1'500.000	KPa
Kr	0.813491	0.813491	0.813491	0.813491	0.813491	0.813491	0.813491	0.813491	0.813491	
Kc	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	
Ks	1 / 1.0	1 / 1.1	1 / 1.1	1 / 1.0	1 / 1.0	1 / 1.0	1 / 1.0	1 / 1.0	1 / 1.0	
et (DAS Y PANDEY)	3.04×10^{-4}	3.04×10^{-4}	3.04×10^{-4}	3.04×10^{-4}	3.04×10^{-4}	3.04×10^{-4}	3.04×10^{-4}	3.04×10^{-4}	3.04×10^{-4}	mm/mm
et admisible	2.72×10^{-4}	2.47×10^{-4}	2.47×10^{-4}	2.72×10^{-4}	2.72×10^{-4}	2.72×10^{-4}	2.72×10^{-4}	2.72×10^{-4}	2.72×10^{-4}	mm/mm
ez admisible	4.81×10^{-4}	4.81×10^{-4}	4.81×10^{-4}	4.81×10^{-4}	4.81×10^{-4}	4.81×10^{-4}	4.81×10^{-4}	4.81×10^{-4}	4.81×10^{-4}	mm/mm

Cuadro 19

RESUMEN DE DISEÑO AUTORES
PROYECTO: CERRITOS – CAUYÁ
PROGRAMA: DEPAV

TRAMO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	UNIDADES
ESFUERZOS ADMISIBLES										
ϵ_t	2.72×10^{-4}	2.47×10^{-4}	2.47×10^{-4}	2.72×10^{-4}	2.72×10^{-4}	2.72×10^{-4}	2.72×10^{-4}	2.72×10^{-4}	2.72×10^{-4}	mm/mm
ϵ_z	4.81×10^{-4}	4.81×10^{-4}	4.81×10^{-4}	4.81×10^{-4}	4.81×10^{-4}	4.81×10^{-4}	4.81×10^{-4}	4.81×10^{-4}	4.81×10^{-4}	mm/mm
MÓDULO SOBRECARPETA	15,295.74	15,295.74	15,295.74	15,295.74	15,295.74	15,295.74	15,295.74	15,295.74	15,295.74	Kgr/cm ²
ESPELOR SOBRECARPETA	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	cm
CONDICIÓN DE LIGA	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	
MÓDULO REFUERZO GRANULAR	4,894.64	4,894.64	4,894.64	4,894.64	4,894.64	4,894.64	4,894.64	4,894.64	4,894.64	Kgr/cm ²
ESPELOR REFUERZO GRANULAR	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	cm
CONDICIÓN DE LIGA	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	
MÓDULO CARPETA	1,400.00	1,400.00	1,400.00	1,400.00	1,400.00	1,400.00	1,400.00	1,400.00	1,400.00	Kgr/cm ²
ESPELOR CARPETA	18.00	10.00	20.00	10.00	20.00	10.00	20.00	10.00	15.00	cm
CONDICIÓN DE LIGA	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	
MÓDULO CAPA BASE	3,569.01	4,415.37	4,711.09	2,498.31	3,772.95	2,549.29	2,549.29	2,855.21	3,874.92	Kgr/cm ²
ESPELOR CAPA BASE	40.00	60.00	40.00	30.00	15.00	70.00	40.00	40.00	70.00	cm
CONDICIÓN DE LIGA	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	
MÓDULO CAPA SUBBASE	2,549.29			2,039.43	2,906.19		2,345.35	2,651.26		Kgr/cm ²
ESPELOR CAPA SUBBASE	15.00			20.00	15.00		40.00	50.00		cm
CONDICIÓN DE LIGA	NO			NO	NO		NO	NO		
MÓDULO SUBRASANTE	2,039.43	968.73	970.77	1,682.53	2,753.23	1,937.46	2,243.38	1,937.46	2,957.18	Kgr/cm ²
ESFUERZOS CALCULADOS										
ϵ_t	2.24×10^{-4}	2.22×10^{-4}	2.24×10^{-4}	2.26×10^{-4}	2.25×10^{-4}	2.24×10^{-4}	2.25×10^{-4}	2.24×10^{-4}	2.24×10^{-4}	mm/mm
ϵ_z	2.19×10^{-5}	2.68×10^{-5}	3.43×10^{-5}	3.54×10^{-5}	2.80×10^{-5}	1.69×10^{-5}	1.60×10^{-5}	1.81×10^{-5}	1.28×10^{-5}	mm/mm

NOTA: Módulo del refuerzo granular obtenido por VÁSQUEZ y VÁSQUEZ (Investigación inédita).

OBSERVACIONES AL DISEÑO

CERRITOS –CAUYÁ

1. El autor se refiere como reciclaje, al tratamiento a realizar, el cual realmente es un fresado, pues no sugiere la adición de ningún tipo de ligante, ni de aditivos como pueden ser de los del tipo rejuvenecedores.
2. El consultor utiliza el método AASHTO para el diseño de refuerzo de carpeta. Sin embargo, no es confiable, puesto que está mal aplicado.
3. Al calcular el número estructural SN requerido para el total de la estructura, con el programa AASHTO 93 (Vásquez, 2000), se encuentra que el valor tomado por el consultor es mayor al calculado en la segunda cifra significativa, lo cual genera una condición de seguridad. El proceso de cálculo del SN del consultor no es claro, y se anota que usa un $S_o = 0.40$ que es incorrecto, pues la AASHTO sugiere un valor de 0.49 para las rehabilitaciones.
4. El consultor no explica como calcula los coeficientes estructurales que usa.

5. El consultor plantea dos (2) alternativas de refuerzo, una con fresado, mezcla de este material con base granular, y la otra con sobre carpeta de asfalto en dos capas, una mezcla abierta en caliente y otra capa de mezcla densa en caliente.

6. El consultor habla de capa granular, como la suma del fresado de la carpeta existente más la adición de base tipo INVIAS, pero no indica la proporción; en los tramos 1, 2, 3, 6, 7, 8 y 9, obtiene un espesor menor que el existente, sin aclarar si hay un retiro de material o si se considera la reducción de espesor como un efecto constructivo.

7. Los autores proponen diseñar con quince (15) centímetros de Refuerzo Granular y espesor de sobrecarpeta de diez (10) centímetros, estructura con la cual chequean los refuerzos necesarios en todos los tramos.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE DISEÑO

CERRITOS – CAUYÁ TRAMO 1

DISEÑO CONSULTOR ALTERNATIVA 1

(MDC2) Eca = 30000 Kgr / cm ²	L	7 cm
(B.G.) Ebg = 4500 Kgr / cm ²	L	17 cm
(C.G.) Ecg = 1600 Kgr / cm ²	L	55 cm
(S.R.) Esr = 480 Kgr / cm ²		

DISEÑO AUTORES

(C.A.) Eca = 15295.74 Kgr / cm ²	L	10 cm
(R.G.) Ebg = 4894.64 Kgr / cm ²	N	15 cm
(C.A.) Eca = 1400.00 Kgr / cm ²	L	18 cm
(B.G.) Ebg = 3569.01 Kgr / cm ²	N	40 cm
(SB.G.) Esbg = 2549.29 Kgr / cm ²	N	15 cm
(S.R.) Esr = 2039.43 Kgr / cm ²		

Para el consultor B.G. es “reciclaje” carpeta existente + base granular tipo INVIAS.

DISEÑO CONSULTOR ALTERNATIVA 2

(MDC2) Eca = 30000 Kgr / cm ²	L	7 cm
(MAC2) Eca = 22000 Kgr / cm ²	L	8 cm
(C.A.) Eca = 2450.00 Kgr / cm ²	L	18 cm
(C.G.) Ecg = 1600 Kgr / cm ²	L	55 cm
(S.R.) Esr = 480 Kgr / cm ²		

DISEÑO AUTORES

(C.A.) Eca = 15295.74 Kgr / cm ²	L	10 cm
(R.G.) Ebg = 4894.64 Kgr / cm ²	N	15 cm
(C.A.) Eca = 1400.00 Kgr / cm ²	L	18 cm
(B.G.) Ebg = 3569.01 Kgr / cm ²	N	40 cm
(SB.G.) Esbg = 2549.29 Kgr / cm ²	N	15 cm
(S.R.) Esr = 2039.43 Kgr / cm ²		

Para los autores R.G. es un refuerzo granular con material con calidad de base.

CERRITOS – CAUYÁ TRAMO 2

DISEÑO CONSULTOR ALTERNATIVA 1

(MDC2) Eca = 30000 Kgr / cm ²	L	7 cm
(B.G.) Ebg = 4500 Kgr / cm ²	L	10cm
(C.G.) Ecg = 1800 Kgr / cm ²	L	60 cm
(S.R.) Esr = 460 Kgr / cm ²		

DISEÑO AUTORES

(C.A.) Eca = 15295.74 Kgr / cm ²	L	10 cm
(R.G.) Ebg = 4894.64 Kgr / cm ²	N	15 cm
(C.A.) Eca = 1400.00 Kgr / cm ²	L	10 cm
(B.G.) Ebg = 4415.37 Kgr / cm ²	N	60 cm
(S.R.) Esr = 968.73 Kgr / cm ²		

Para el consultor B.G. es “reciclaje” carpeta existente + base granular tipo INVIAS.

DISEÑO CONSULTOR ALTERNATIVA 2

(MDC2) Eca = 30000 Kgr / cm ²	L	7 cm
(MAC2) Eca = 22000 Kgr / cm ²	L	8 cm
(C.A.) Eca = 22000.00 Kgr / cm ²	L	10 cm
(C.G.) Ecg = 1800 Kgr / cm ²	L	60 cm
(S.R.) Esr = 460 Kgr / cm ²		

DISEÑO AUTORES

(C.A.) Eca = 15295.74 Kgr / cm ²	L	10 cm
(R.G.) Ebg = 4894.64 Kgr / cm ²	N	15 cm
(C.A.) Eca = 1400.00 Kgr / cm ²	L	10 cm
(B.G.) Ebg = 4415.37 Kgr / cm ²	N	60 cm
(S.R.) Esr = 968.73 Kgr / cm ²		

Para los autores R.G. es un refuerzo granular con material con calidad de base.

CERRITOS – CAUYÁ TRAMO 3

DISEÑO CONSULTOR ALTERNATIVA 1

(MDC2) Eca = 30000 Kgr / cm ²	L	7 cm
(B.G.) Ebg = 4500 Kgr / cm ²	L	16 cm
(C.G.) Ecg = 1700 Kgr / cm ²	L	40 cm
(S.R.) Esr = 800 Kgr / cm ²		

DISEÑO AUTORES

(C.A.) Eca = 15295.74 Kgr / cm ²	L	10 cm
(R.G.) Ebg = 4894.64 Kgr / cm ²	N	15 cm
(C.A.) Eca = 1400.00 Kgr / cm ²	L	20 cm
(B.G.) Ebg = 4711.09 Kgr / cm ²	N	40 cm
(S.R.) Esr = 970.77 Kgr / cm ²		

Para el consultor B.G. es “reciclaje” carpeta existente + base granular tipo INVIAS.

DISEÑO CONSULTOR ALTERNATIVA 2

(MDC2) Eca = 30000 Kgr / cm ²	L	7 cm
(MAC2) Eca = 22000 Kgr / cm ²	L	8 cm
(C.A.) Eca = 4700.00 Kgr / cm ²	L	20 cm
(C.G.) Ecg = 1700 Kgr / cm ²	L	40 cm
(S.R.) Esr = 800 Kgr / cm ²		

DISEÑO AUTORES

(C.A.) Eca = 15295.74 Kgr / cm ²	L	10 cm
(R.G.) Ebg = 4894.64 Kgr / cm ²	N	15 cm
(C.A.) Eca = 1400.00 Kgr / cm ²	L	20 cm
(B.G.) Ebg = 4711.09 Kgr / cm ²	N	40 cm
(S.R.) Esr = 970.77 Kgr / cm ²		

Para los autores R.G. es un refuerzo granular con material con calidad de base.

CERRITOS – CAUYÁ TRAMO 4

DISEÑO CONSULTOR ALTERNATIVA 1

(MDC2) Eca = 30000 Kgr / cm ²	L	7 cm
(B.G.) Ebg = 4500 Kgr / cm ²	L	22 cm
(C.G.) Ecg = 1600 Kgr / cm ²	L	50 cm
(S.R.) Esr = 470 Kgr / cm ²		

DISEÑO AUTORES

(C.A.) Eca = 15295.74 Kgr / cm ²	L	10 cm
(R.G.) Ebg = 4894.64 Kgr / cm ²	N	15 cm
(C.A.) Eca = 1400.00 Kgr / cm ²	L	10 cm
(B.G.) Ebg = 2498.31 Kgr / cm ²	N	30 cm
(SB.G.) Esbg = 2039.43 Kgr / cm ²	N	20 cm
(S.R.) Esr = 1682.53 Kgr / cm ²		

Para el consultor B.G. es “reciclaje” carpeta existente + base granular tipo INVIAS.

DISEÑO CONSULTOR ALTERNATIVA 2

(MDC2) Eca = 30000 Kgr / cm ²	L	10 cm
(MAC2) Eca = 22000 Kgr / cm ²	L	15 cm
(C.A.) Eca = 5500 Kgr / cm ²	L	10 cm
(C.G.) Ecg = 1600 Kgr / cm ²	L	50 cm
(S.R.) Esr = 470 Kgr / cm ²		

DISEÑO AUTORES

(C.A.) Eca = 15295.74 Kgr / cm ²	L	10 cm
(R.G.) Ebg = 4894.64 Kgr / cm ²	N	15 cm
(C.A.) Eca = 1400.00 Kgr / cm ²	L	10 cm
(B.G.) Ebg = 2498.31 Kgr / cm ²	N	30 cm
(SB.G.) Esbg = 2039.43 Kgr / cm ²	N	20 cm
(S.R.) Esr = 1682.53 Kgr / cm ²		

Para los autores R.G. es un refuerzo granular con material con calidad de base.

CERRITOS – CAUYÁ TRAMO 5

DISEÑO CONSULTOR ALTERNATIVA 1

(MDC2) Eca = 30000 Kgr / cm ²	L	10 cm
(B.G.) Ebg = 4500 Kgr / cm ²	L	23 cm
(C.G.) Ecg = 1500 Kgr / cm ²	L	30 cm
(S.R.) Esr = 610 Kgr / cm ²		

DISEÑO AUTORES

(C.A.) Eca = 15295.74 Kgr / cm ²	L	10 cm
(R.G.) Ebg = 4894.64 Kgr / cm ²	N	15 cm
(C.A.) Eca = 1400.00 Kgr / cm ²	L	20 cm
(B.G.) Ebg = 3772.95 Kgr / cm ²	N	15 cm
(SB.G.) Esbg = 2906.19 Kgr / cm ²	N	15 cm
(S.R.) Esr = 2753.23 Kgr / cm ²		

Para el consultor B.G. es “reciclaje” carpeta existente + base granular tipo INVIAS.

DISEÑO CONSULTOR ALTERNATIVA 2

(MDC2) Eca = 30000 Kgr / cm ²	L	7 cm
(MAC2) Eca = 22000 Kgr / cm ²	L	8 cm
(C.A.) Eca = 2600 Kgr / cm ²	L	20 cm
(C.G.) Ecg = 1500 Kgr / cm ²	L	30 cm
(S.R.) Esr = 610 Kgr / cm ²		

DISEÑO AUTORES

(C.A.) Eca = 15295.74 Kgr / cm ²	L	10 cm
(R.G.) Ebg = 4894.64 Kgr / cm ²	N	15 cm
(C.A.) Eca = 1400.00 Kgr / cm ²	L	20 cm
(B.G.) Ebg = 3772.95.31 Kgr / cm ²	N	15 cm
(SB.G.) Esbg = 2906.19 Kgr / cm ²	N	15 cm
(S.R.) Esr = 2753.23 Kgr / cm ²		

Para los autores R.G. es un refuerzo granular con material con calidad de base.

CERRITOS – CAUYÁ TRAMO 6

DISEÑO CONSULTOR ALTERNATIVA 1

(MDC2) Eca = 30000 Kgr / cm ²	L	7 cm
(B.G.) Ebg = 4500 Kgr / cm ²	L	8 cm
(C.G.) Ecg = 1700 Kgr / cm ²	L	70 cm
(S.R.) Esr = 600 Kgr / cm ²		

DISEÑO AUTORES

(C.A.) Eca = 15295.74 Kgr / cm ²	L	10 cm
(R.G.) Ebg = 4894.64 Kgr / cm ²	N	15 cm
(C.A.) Eca = 1400.00 Kgr / cm ²	L	10 cm
(B.G.) Ebg = 2549.29 Kgr / cm ²	N	70 cm
(S.R.) Esr = 1937.46 Kgr / cm ²		

Para el consultor B.G. es “reciclaje” carpeta existente + base granular tipo INVIAS.

DISEÑO CONSULTOR ALTERNATIVA 2

(MDC2) Eca = 30000 Kgr / cm ²	L	7 cm
(MAC2) Eca = 22000 Kgr / cm ²	L	8 cm
(C.A.) Eca = 7200.00 Kgr / cm ²	L	10 cm
(C.G.) Ecg = 1700 Kgr / cm ²	L	70 cm
(S.R.) Esr = 600 Kgr / cm ²		

DISEÑO AUTORES

(C.A.) Eca = 15295.74 Kgr / cm ²	L	10 cm
(R.G.) Ebg = 4894.64 Kgr / cm ²	N	15 cm
(C.A.) Eca = 1400.00 Kgr / cm ²	L	10 cm
(B.G.) Ebg = 2549.29 Kgr / cm ²	N	70 cm
(S.R.) Esr = 1937.46 Kgr / cm ²		

Para los autores R.G. es un refuerzo granular con material con calidad de base.

CERRITOS – CAUYÁ TRAMO 7

DISEÑO CONSULTOR ALTERNATIVA 1

(MDC2) Eca = 30000 Kgr / cm ²	L	7 cm
(B.G.) Ebg = 4500 Kgr / cm ²	L	8 cm
(C.G.) Ecg = 1600 Kgr / cm ²	L	80 cm
(S.R.) Esr = 500 Kgr / cm ²		

DISEÑO AUTORES

(C.A.) Eca = 15295.74 Kgr / cm ²	L	10 cm
(R.G.) Ebg = 4894.64 Kgr / cm ²	N	15 cm
(C.A.) Eca = 1400.00 Kgr / cm ²	L	20 cm
(B.G.) Ebg = 2549.29 Kgr / cm ²	N	40 cm
(SB.G.) Esbg = 2345.35 Kgr / cm ²	N	40 cm
(S.R.) Esr = 2243.38 Kgr / cm ²		

Para el consultor B.G. es “reciclaje” carpeta existente + base granular tipo INVIAS.

DISEÑO CONSULTOR ALTERNATIVA 2

(MDC2) Eca = 30000 Kgr / cm ²	L	7 cm
(MAC2) Eca = 22000 Kgr / cm ²	L	8 cm
(C.A.) Eca = 2600 Kgr / cm ²	L	10 cm
(C.G.) Ecg = 1600 Kgr / cm ²	L	80 cm
(S.R.) Esr = 500 Kgr / cm ²		

DISEÑO AUTORES

(C.A.) Eca = 15295.74 Kgr / cm ²	L	10 cm
(R.G.) Ebg = 4894.64 Kgr / cm ²	N	15 cm
(C.A.) Eca = 1400.00 Kgr / cm ²	L	20 cm
(B.G.) Ebg = 2549.29 Kgr / cm ²	N	40 cm
(SB.G.) Esbg = 2345.35 Kgr / cm ²	N	40 cm
(S.R.) Esr = 2243.38 Kgr / cm ²		

Para los autores R.G. es un refuerzo granular con material con calidad de base.

CERRITOS – CAUYÁ TRAMO 8

DISEÑO CONSULTOR ALTERNATIVA 1

(MDC2) Eca = 30000 Kgr / cm ²	L	7 cm
(B.G.) Ebg = 4500 Kgr / cm ²	L	8 cm
(C.G.) Ecg = 1700 Kgr / cm ²	L	90 cm
(S.R.) Esr = 580 Kgr / cm ²		

DISEÑO AUTORES

(C.A.) Eca = 15295.74 Kgr / cm ²	L	10 cm
(R.G.) Ebg = 4894.64 Kgr / cm ²	N	15 cm
(C.A.) Eca = 1400.00 Kgr / cm ²	L	10 cm
(B.G.) Ebg = 2855.21 Kgr / cm ²	N	40 cm
(SB.G.) Esbg = 2651.26 Kgr / cm ²	N	50 cm
(S.R.) Esr = 1937.46 Kgr / cm ²		

Para el consultor B.G. es “reciclaje” carpeta existente + base granular tipo INVIAS.

DISEÑO CONSULTOR ALTERNATIVA 2

(MDC2) Eca = 30000 Kgr / cm ²	L	7 cm
(MAC2) Eca = 22000 Kgr / cm ²	L	8 cm
(C.A.) Eca = 4050 Kgr / cm ²	L	10 cm
(C.G.) Ecg = 1700 Kgr / cm ²	L	90 cm
(S.R.) Esr = 580 Kgr / cm ²		

DISEÑO AUTORES

(C.A.) Eca = 15295.74 Kgr / cm ²	L	10 cm
(R.G.) Ebg = 4894.64 Kgr / cm ²	N	15 cm
(C.A.) Eca = 1400.00 Kgr / cm ²	L	10 cm
(B.G.) Ebg = 2855.21 Kgr / cm ²	N	40 cm
(SB.G.) Esbg = 2651.26 Kgr / cm ²	N	50 cm
(S.R.) Esr = 1937.46 Kgr / cm ²		

Para los autores R.G. es un refuerzo granular con material con calidad de base.

CERRITOS – CAUYÁ TRAMO 9

DISEÑO CONSULTOR ALTERNATIVA 1

(MDC2) Eca = 30000 Kgr / cm ²	L	7 cm
(B.G.) Ebg = 4500 Kgr / cm ²	L	8 cm
(C.G.) Ecg = 2730 Kgr / cm ²	L	70 cm
(S.R.) Esr = 550 Kgr / cm ²		

DISEÑO AUTORES

(C.A.) Eca = 15295.74 Kgr / cm ²	L	10 cm
(R.G.) Ebg = 4894.64 Kgr / cm ²	N	15 cm
(C.A.) Eca = 1400.00 Kgr / cm ²	N	15 cm
(B.G.) Ebg = 3874.92 Kgr / cm ²	N	70 cm
(S.R.) Esr = 2957.18 Kgr / cm ²		

Para el consultor B.G. es “reciclaje” carpeta existente + base granular tipo INVIAS.

DISEÑO CONSULTOR ALTERNATIVA 2

(MDC2) Eca = 30000 Kgr / cm ²	L	7 cm
(MAC2) Eca = 22000 Kgr / cm ²	L	8 cm
(C.A.) Eca = 2730.00 Kgr / cm ²	L	15 cm
(C.G.) Ecg = 1500 Kgr / cm ²	L	70 cm
(S.R.) Esr = 550 Kgr / cm ²		

DISEÑO AUTORES

(C.A.) Eca = 15295.74 Kgr / cm ²	L	10 cm
(R.G.) Ebg = 4894.64 Kgr / cm ²	N	15 cm
(C.A.) Eca = 1400.00 Kgr / cm ²	N	15 cm
(B.G.) Ebg = 3874.92 Kgr / cm ²	N	70 cm
(S.R.) Esr = 2957.18 Kgr / cm ²		

Para los autores R.G. es un refuerzo granular con material con calidad de base.

3.3 PROYECTO AVENIDA 30 DE AGOSTO

Cuadro 20

RESUMEN DE MODELACIÓN CONSULTOR

PROYECTO: AVENIDA 30 DE AGOSTO

	SECTOR 1	SECTOR 1	SECTOR 1	SECTOR 2	SECTOR 2	SECTOR 2	SECTOR 2	
TRAMO	1	2	3	1	2	3	4	UNIDADES
DEFLEXIONES DEPAV								
Do	30	44	32	37	55	44	35	1/1000 pulg.
RADIO DE CURVATURA Rc	50	40	47	44	36	40	45	m
MÓDULO CARPETA	31,291.36	31,291.36	31,291.36	31,291.36	31,291.36	31,291.36	31,291.36	psi
ESPESOR CARPETA	4.72	4.72	4.72	4.72	4.72	4.72	4.72	Pulg.
CONDICIÓN DE LIGA	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	
MÓDULO CAPA BASE	20,353.60	14,465.14	18,860.15	17,352.48	12,416.98	14,977.18	17,921.41	psi
ESPESOR CAPA BASE	17.72	17.72	17.72	12.60	12.60	12.60	13.78	Pulg.
CONDICIÓN DE LIGA	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	
MÓDULO SUBRASANTE	9,230.95	5,447.54	8,164.20	8,164.20	4,892.83	6,400.50	8,164.20	psi
DEFLEXIONES UNALCAPA								
Do	29	44	32	36	54	44	35	1/1000 plg
D25	19	31	22	24	38	30	24	1/1000 plg
RADIO BENKELMAN	123	95	123	103	77	88	112	m
CBR SUBRASANTE								
Módulo semilla SR	9,226.56	5,497.36	8,161.15	8,161.15	4,886.13	6,406.78	8,161.15	psi

Nota: La deflexión Do y el radio de curvatura Rc, son tomados de los resultados en DEPAV.

Nota 2 : El radio de curvatura en UNALCAPA es calculado, $Rc=3125 / (D_0-D_{25})$. D en mm.

Cuadro 21

**RESUMEN DE MODELACIÓN AUTORES
PROYECTO: AVENIDA 30 DE AGOSTO
PROGRAMA: KENLAYER**

	SECTOR 1	SECTOR 1	SECTOR 1	SECTOR 2	SECTOR 2	SECTOR 2	SECTOR 2	
	1	2	3	1	2	3	4	UNIDADES
TRAMO								
DEFLEXIONES MEDIDAS								
Do	27	91	39	50	100	71	61	1/100 mm
D25	14	73	25	29	50	43	36	1/100 mm
MÓDULO CARPETA	137,300.00	137,300.00	137,300.00	137,300.00	137,300.00	137,300.00	137,300.00	KPa
ESPESOR CARPETA	0.15	0.15	0.15	0.12	0.12	0.12	0.12	m
CONDICIÓN DE LIGA	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	
MÓDULO CAPA BASE	480,000.00	380,000.00	450,000.00	197,000.00	104,000.00	135,500.00	171,500.00	KPa
ESPESOR CAPA BASE	0.25	0.25	0.25	0.30	0.30	0.30	0.30	m
CONDICIÓN DE LIGA	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	
MÓDULO CAPA SUBBASE	370,000.00	150,000.00	240,000.00					KPa
ESPESOR CAPA SUBBASE	0.20	0.20	0.20					m
CONDICIÓN DE LIGA	NO	NO	NO					
MÓDULO SUBRASANTE	325,000.00	36,000.00	152,000.00	142,000.00	98,000.00	98,000.00	110,000.00	KPa
DEFLEXIONES CALCULADAS								
Do	27	92	39	50	100	71	61	1/100 mm
D25	14	73	24	29	50	43	36	1/100 mm
CBR SUBRASANTE	9.50	4.60	8.00	8.00	3.90	5.70	8.00	%
Módulo semilla SR	63,614.88	37,902.96	56,269.14	56,269.14	33,688.69	44,173.18	56,269.14	KPa

Cuadro 22

**RESUMEN DE MODELACIÓN AUTORES
PROYECTO: AVENIDA 30 DE AGOSTO
PROGRAMA: UNALCAPA**

	SECTOR 1	SECTOR 1	SECTOR 1	SECTOR 2	SECTOR 2	SECTOR 2	SECTOR 2	
TRAMO	1	2	3	1	2	3	4	UNIDADES
DEFLEXIONES MEDIDAS								
Do	11	36	15	20	39	28	24	1/1000 plg
D25	6	29	10	11	20	17	14	1/1000 pulg.
MÓDULO CARPETA	19,913.68	19,913.68	19,913.68	19,913.68	19,913.68	19,913.68	19,913.68	psi
ESPESOR CARPETA	5.91	5.91	5.91	4.72	4.72	4.72	4.72	pulg.
CONDICIÓN DE LIGA	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	
MÓDULO CAPA BASE	69,618.11	55,114.33	65,266.97	28,572.43	15,083.92	19,652.61	24,873.97	psi
ESPESOR CAPA BASE	9.84	9.84	9.84	11.81	11.81	11.81	11.81	pulg.
CONDICIÓN DE LIGA	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	
MÓDULO CAPA SUBBASE	53,663.96	21,755.66	34,809.05					psi
ESPESOR CAPA SUBBASE	7.87	7.87	7.87					pulg.
CONDICIÓN DE LIGA	NO	NO	NO					
MÓDULO SUBRASANTE	47,137.76	5,221.36	22,045.73	20,595.35	14,213.69	14,213.70	15,954.15	psi
DEFLEXIONES CALCULADAS								
Do	11	36	15	20	39	28	24	1/1000 plg
D25	5	29	10	11	20	17	14	1/1000 plg
CBR SUBRASANTE								
Módulo semilla SR	9,226.56	5,497.36	8,161.15	8,161.15	4,886.13	6,406.78	8,161.15	psi

OBSERVACIONES A LA MODELACIÓN

AVENIDA 30 DE AGOSTO

1. El consultor contrario a lo que él mismo plantea, no utiliza los módulos de concreto asfáltico propios para modelación con viga Benkelman. Utiliza un módulo de $2,200 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$ para todos los tramos de ambos sectores.
2. El hecho de utilizar módulos de carpeta asfáltica diferentes a los recomendados para modelación con viga BENKELMAN, hace que esta no sea confiable junto con el diseño de refuerzo basado en ella.
3. El consultor modela con DEPAV; tres (3) capas, carpeta, capa granular y subrasante, modelando aparentemente para coincidir con la deflexión característica D_c y el radio de curvatura R_c .
4. En el Cuadro No Resumen de modelación del consultor, puede apreciarse la diferencia entre el R_c del DEPAV y el $R_{\text{benkelman}}$ calculado con las deflexiones D_o y D_{25} de UNALCAPA.

5. En el sector uno (1) existe diferencia en el espesor de carpeta, ya que los autores tomaron lo reportado por el autor en el informe, mientras que el autor disminuyó esta capa en tres (3) centímetros, sin dar razón alguna para ello.
6. Los autores modelan con KENLAYER y UNALCAPA; tres (3) o cuatro (4) capas, para una mayor aproximación al comportamiento de la estructura, encontrando los valores buscados D_0 y D_{25} , sin necesidad de artificios como utilizar módulos de la carpeta asfáltica ajenos a las condiciones del ensayo de viga Benkelman.
7. En el sector dos (2) los autores toman el valor más crítico de espesor de capa granular treinta (30) centímetros, el consultor toma treinta y dos (32), en el informe él mismo reporta un rango entre treinta (30) y treinta y siete (37) centímetros, y no un valor.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE MODELACIÓN

AVENIDA 30 DE AGOSTO – PEREIRA

SECTOR 1 – TRAMO 1

MODELACIÓN CONSULTOR

$Eca = 2200 \text{ Kgr / cm}^2$	L	12 cm
$Ecg = 1431 \text{ Kgr / cm}^2$	N	45 cm
$Esr = 649 \text{ Kgr / cm}^2$		

MODELACIÓN AUTORES

$Eca = 1400.07 \text{ Kgr / cm}^2$	L	15 cm
$Ebg = 4894.64 \text{ Kgr / cm}^2$	N	25 cm
$Esg = 3772.95 \text{ Kgr / cm}^2$	N	20 cm
$Esr = 3314.08 \text{ Kgr / cm}^2$		

AVENIDA 30 DE AGOSTO – PEREIRA

SECTOR 1 – TRAMO 2

MODELACIÓN CONSULTOR

$Eca = 2200 \text{ Kgr / cm}^2$	L	12 cm
$Ecg = 1017 \text{ Kgr / cm}^2$	N	45 cm
$Esr = 383 \text{ Kgr / cm}^2$		

MODELACIÓN AUTORES

$Eca = 1400.07 \text{ Kgr / cm}^2$	L	15 cm
$Ebg = 3874.92 \text{ Kgr / cm}^2$	N	25 cm
$Esg = 1529.57 \text{ Kgr / cm}^2$	N	20 cm
$Esr = 367.10 \text{ Kgr / cm}^2$		

AVENIDA 30 DE AGOSTO – PEREIRA

SECTOR 1 – TRAMO 3

MODELACIÓN CONSULTOR

$Eca = 2200 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$	L	12 cm
$Ecg = 1326 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$	N	45 cm
$Esr = 574 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$		

MODELACIÓN AUTORES

$Eca = 1400.07 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$	L	15 cm
$Ebg = 4588.72 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$	N	25 cm
$Esg = 2447.32 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$	N	20 cm
$Esr = 1549.97 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$		

AVENIDA 30 DE AGOSTO – PEREIRA

SECTOR 2 – TRAMO 1

MODELACIÓN CONSULTOR

$Eca = 2200 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$	L	12 cm
$Ecg = 1220 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$	N	32 cm
$Esr = 574 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$		

MODELACIÓN AUTORES

$Eca = 1400.07 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$	L	12 cm
$Ebg = 2008.84 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$	N	30 cm
$Esr = 1448.00 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$		

AVENIDA 30 DE AGOSTO – PEREIRA

SECTOR 2 – TRAMO 2

MODELACIÓN CONSULTOR

$Eca = 2200 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$	L	12 cm
$Ecg = 873 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$	N	32 cm
$Esr = 344 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$		

MODELACIÓN AUTORES

$Eca = 1400.07 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$	L	12 cm
$Ebg = 1060.50 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$	N	30 cm
$Eca = 999.32 \text{ Kgr} / \text{cm}^2$		

AVENIDA 30 DE AGOSTO – PEREIRA

SECTOR 2 – TRAMO 3

MODELACIÓN CONSULTOR

$Eca = 2200 \text{ Kgr / cm}^2$	L	12 cm
$Ecg = 1053 \text{ Kgr / cm}^2$	N	32 cm
$Esr = 450 \text{ Kgr/cm}^2$		

MODELACIÓN AUTORES

$Eca = 1400.07 \text{ Kgr / cm}^2$	N	12 cm
$Ebg = 1381.72 \text{ Kgr / cm}^2$	N	30 cm
$Eca = 999.32 \text{ Kgr / cm}^2$		

AVENIDA 30 DE AGOSTO – PEREIRA

SECTOR 2 – TRAMO 4

MODELACIÓN CONSULTOR

$Eca = 2200 \text{ Kgr / cm}^2$	L	12 cm
$Ecg = 1260 \text{ Kgr / cm}^2$	N	32 cm
$Esr = 574 \text{ Kgr/cm}^2$		

MODELACIÓN AUTORES

$Eca = 1400.07 \text{ Kgr / cm}^2$	L	12 cm
$Ebg = 1748.81 \text{ Kgr / cm}^2$	N	30 cm
$Eca = 1121.69 \text{ Kgr / cm}^2$		

Cuadro 23

RESUMEN DE DISEÑO CONSULTOR
PROYECTO: AVENIDA 30 DE AGOSTO
PROGRAMA : DEPAV

	SECTOR 1			SECTOR 2				
	1	2	3	1	2	3	4	UNIDADES
TRAMO								
ESFUERZOS ADMISIBLES								
ϵ_t	3.87×10^{-4}	3.87×10^{-4}	3.87×10^{-4}	3.90×10^{-4}	3.87×10^{-4}	3.87×10^{-4}	3.87×10^{-4}	mm/mm
σ_z	0.756	0.446	0.668	0.668	0.400	0.524	0.608	Kgr/cm ²
MÓDULO CARPETA	15,000.00	15,000.00	15,000.00	15,000.00	15,000.00	15,000.00	15,000.00	Kgr/cm ²
ESPESOR CARPETA	10.00	10.00	10.00	10.00	12.00	10.00	10.00	cm
CONDICIÓN DE LIGA	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	
MÓDULO CAPA GRANULAR	3,233.00	2,805.00	3,075.00	2,912.00	2,438.00	2,781.00	2,791.00	Kgr/cm ²
ESPESOR CAPA GRANULAR	20.00	30.00	20.00	20.00	30.00	30.00	20.00	cm
CONDICIÓN DE LIGA	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	
MÓDULO GRANULAR EXISTENTE	1,399.00	928.00	1,295.00	1,192.00	775.00	941.00	1,119.00	Kgr/cm ²
ESPESOR GRANULAR EXISTENTE	40.00	30.00	40.00	27.00	20.00	20.00	27.00	cm
CONDICIÓN DE LIGA	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	
MÓDULO SUBRASANTE	649.00	383.00	574.00	574.00	344.00	450.00	522.00	Kgr/cm ²
ESFUERZOS CALCULADOS								
ϵ_t	2.93×10^{-4}	2.96×10^{-4}	3.06×10^{-4}	3.21×10^{-4}	3.03×10^{-4}	2.99×10^{-4}	3.32×10^{-4}	mm/mm
σ_z	0.337	0.242	0.326	0.418	0.245	0.296	0.407	Kgr/cm ²

NOTA: La capa granular, es el RAP del fresado + material de base tipo INVIAS, retirando el material sobrante.

DISEÑO AUTORES

AVENIDA 30 DE AGOSTO SECTOR 1 TRAMO 1

ANÁLISIS DE LOS ESFUERZOS DE TRABAJO

Selección del riesgo

RIESGO DE DISEÑO	15%
VARIABLE NORMAL (u)	-1.04

Esfuerzo de trabajo a tensión en parte inferior de la capa asfáltica.

FUNCIÓN	Das & Pandey (India)
f_1	2,657.8721
f_2	3.5650
f_3	1.4747
N (ESAL)	4,000,000
WMAAT (°C)	
Tmix (°C)	25.0
E_{AC} (KPa)	14,500,000
ϵ_t (mm/mm)	-1.6626E-04

ϵ_t (mm/mm)		-1.6626E-04
k_r		0.81349189
k_c		1.1
k_s		1.000000
ϵ_t (mm/mm) admisible		-1.4878E-04

Esfuerzo de trabajo a compresión en la Parte superior de la subrasante.

Coefficiente A

TPDA Comercial / Carril diseño / Año 1	< 150	> = 150
A	0.016	0.012

Coefficiente Kr

U	-1.04
SN	0.30
C	0.02
$b = -1/f_2$	-0.280505
Sh	1.00
δ	0.308356
k_r	0.813492

Coefficiente Kc

MATERIAL	Base asfáltica	Concreto asfáltico	Concreto asfáltico de alto módulo
k_c	1.3	1.1	1.0

Coefficiente Ks

MÓDULO	$E_{SR} < 50,000$ KPa	$50,000 \leq E_{SR} < 120,000$ Kpa	$E_{SR} \geq 120,000$ KPa
k_s	0.833333	0.909091	1.0

Subrasante : 3314 Kgr. / cm²

A	0.016
N (ESAL)	7,200,000
ϵ_z (mm/mm) admisible	4.1143 E-04

DISEÑO AUTORES

AVENIDA 30 DE AGOSTO SECTOR 1 TRAMO 2

ANÁLISIS DE LOS ESFUERZOS DE TRABAJO

Selección del riesgo.

RIESGO DE DISEÑO	15%
VARIABLE NORMAL (u)	-1.04

Esfuerzo de trabajo a tensión en parte inferior de la capa asfáltica.

FUNCIÓN	Das & Pandey (India)
f_1	2,657.8721
f_2	3.5650
f_3	1.4747
N (ESAL)	4,000,000
WMAAT (°C)	
Tmix (°C)	25.0
E_{AC} (KPa)	14,500,000
ϵ_t (mm/mm)	-1.6626E-04

ϵ_t (mm/mm)		-1.6626E-04
k_r		0.81349189
k_c		1.1
k_s		0.833333
ϵ_t (mm/mm) admisible		-1.2398E-04

Esfuerzo de trabajo a compresión en la Parte superior de la subrasante.

Coefficiente A

TPDA Comercial / Carril diseño / Año 1	< 150	> = 150
A	0.016	0.012

Coefficiente Kr

U	-1.04
SN	0.30
C	0.02
$b = -1/f_2$	-0.280505
Sh	1.00
δ	0.308356
k_r	0.813492

Coefficiente Kc

MATERIAL	Base asfáltica	Concreto asfáltico	Concreto asfáltico de alto módulo
k_c	1.3	1.1	1.0

Coefficiente Ks

MÓDULO	$E_{SR} < 50,000$ KPa	$50,000 \leq E_{SR} < 120,000$ Kpa	$E_{SR} \geq 120,000$ KPa
k_s	0.833333	0.909091	1.0

Subrasante : 367 Kgr. / cm²

A	0.016
N (ESAL)	7,200,000
ϵ_z (mm/mm) admisible	4.1143 E-04

DISEÑO AUTORES

AVENIDA 30 DE AGOSTO SECTOR 1 TRAMO 3

ANÁLISIS DE LOS ESFUERZOS DE TRABAJO

Selección del riesgo.

RIESGO DE DISEÑO	15%
VARIABLE NORMAL (u)	-1.04

Esfuerzo de trabajo a tensión en parte inferior de la capa asfáltica.

FUNCIÓN	Das & Pandey (India)
f_1	2,657.8721
f_2	3.5650
f_3	1.4747
N (ESAL)	4,000,000
WMAAT (°C)	
Tmix (°C)	25.0
E_{AC} (KPa)	14,500,000
ϵ_t (mm/mm)	-1.6626E-04

ϵ_t (mm/mm)		-1.6626E-04
k_r		0.81349189
k_c		1.1
k_s		1.000000
ϵ_t (mm/mm) admisible		-1.4878E-04

Esfuerzo de trabajo a compresión en la Parte superior de la subrasante.

Coficiente A

TPDA Comercial / Carril diseño / Año 1	< 150	> = 150
A	0.016	0.012

Coficiente Kr

U	-1.04
SN	0.30
C	0.02
$b = -1/f_2$	-0.280505
Sh	1.00
δ	0.308356
k_r	0.813492

Coficiente Kc

MATERIAL	Base asfáltica	Concreto asfáltico	Concreto asfáltico de alto módulo
k_c	1.3	1.1	1.0

Coficiente Ks

MÓDULO	$E_{SR} < 50,000$ KPa	$50,000 \leq E_{SR} < 120,000$ Kpa	$E_{SR} \geq 120,000$ KPa
k_s	0.833333	0.909091	1.0

Subrasante : 1550 Kgr. / cm²

A	0.016
N (ESAL)	7,200,000
ϵ_z (mm/mm) admisible	4.1143 E-04

DISEÑO AUTORES

AVENIDA 30 DE AGOSTO SECTOR 2 TRAMO 1

ANÁLISIS DE LOS ESFUERZOS DE TRABAJO

Selección del riesgo.

RIESGO DE DISEÑO	15%
VARIABLE NORMAL (u)	-1.04

Esfuerzo de trabajo a tensión en parte inferior de la capa asfáltica.

FUNCIÓN	Das & Pandey (India)
f_1	2,657.8721
f_2	3.5650
f_3	1.4747
N (ESAL)	4,000,000
WMAAT (°C)	
Tmix (°C)	25.0
E_{AC} (KPa)	14,500,000
ϵ_t (mm/mm)	-1.6626E-04

ϵ_t (mm/mm)	-1.6626E-04
k_r	0.81349189
k_c	1.1
k_s	1.000000
ϵ_t (mm/mm) admisible	-1.4878E-04

Esfuerzo de trabajo a compresión en la Parte superior de la subrasante.

Coefficiente A

TPDA Comercial / Carril diseño / Año 1	< 150	> = 150
A	0.016	0.012

Coefficiente Kr

U	-1.04
SN	0.30
C	0.02
$b = -1/f_2$	-0.280505
Sh	1.00
δ	0.308356
k_r	0.813492

Coefficiente Kc

MATERIAL	Base asfáltica	Concreto asfáltico	Concreto asfáltico de alto módulo
k_c	1.3	1.1	1.0

Coefficiente Ks

MÓDULO	$E_{SR} < 50,000$ KPa	$50,000 \leq E_{SR} < 120,000$ Kpa	$E_{SR} \geq 120,000$ KPa
k_s	0.833333	0.909091	1.0

Subrasante : 1448 Kgr. / cm²

A	0.016
N (ESAL)	7,200,000
ϵ_z (mm/mm) admisible	4.1143 E-04

DISEÑO AUTORES

AVENIDA 30 DE AGOSTO SECTOR 2 TRAMO 2

ANÁLISIS DE LOS ESFUERZOS DE TRABAJO

Selección del riesgo .

RIESGO DE DISEÑO	15%
VARIABLE NORMAL (u)	-1.04

Esfuerzo de trabajo a tensión en parte inferior de la capa asfáltica.

FUNCIÓN	Das & Pandey (India)
f_1	2,657.8721
f_2	3.5650
f_3	1.4747
N (ESAL)	4,000,000
WMAAT (°C)	
Tmix (°C)	25.0
E_{AC} (KPa)	14,500,000
ϵ_t (mm/mm)	-1.6626E-04

ϵ_t (mm/mm)		-1.6626E-04
k_r		0.81349189
k_c		1.1
k_s		0.909091
ϵ_t (mm/mm) admisible		-1.3525 E-04

Esfuerzo de trabajo a compresión en la Parte superior de la subrasante.

Coficiente A

TPDA Comercial / Carril diseño / Año 1	< 150	> = 150
A	0.016	0.012

Coficiente Kr

U	-1.04
SN	0.30
C	0.02
$b = -1/f_2$	-0.280505
Sh	1.00
δ	0.308356
k_r	0.813492

Coficiente Kc

MATERIAL	Base asfáltica	Concreto asfáltico	Concreto asfáltico de alto módulo
k_c	1.3	1.1	1.0

Coficiente Ks

MÓDULO	$E_{SR} < 50,000$ KPa	$50,000 \leq E_{SR} < 120,000$ Kpa	$E_{SR} \geq 120,000$ KPa
k_s	0.833333	0.909091	1.0

Subrasante : 999 Kgr. / cm²

A	0.016
N (ESAL)	7,200,000
ϵ_z (mm/mm) admisible	4.1143 E-04

DISEÑO AUTORES

AVENIDA 30 DE AGOSTO SECTOR 2 TRAMO 3

ANÁLISIS DE LOS ESFUERZOS DE TRABAJO

Selección del riesgo.

RIESGO DE DISEÑO	15%
VARIABLE NORMAL (u)	-1.04

Esfuerzo de trabajo a tensión en parte inferior de la capa asfáltica.

FUNCIÓN	Das & Pandey (India)
f_1	2,657.8721
f_2	3.5650
f_3	1.4747
N (ESAL)	4,000,000
WMAAT (°C)	
Tmix (°C)	25.0
E_{AC} (KPa)	14,500,000
ϵ_t (mm/mm)	-1.6626E-04

ϵ_t (mm/mm)	-1.6626E-04
k_r	0.81349189
k_c	1.1
k_s	0.909091
ϵ_t (mm/mm) admisible	-1.3525E-04

Esfuerzo de trabajo a compresión en la Parte superior de la subrasante.

Coefficiente A

TPDA Comercial / Carril diseño / Año 1	< 150	>= 150
A	0.016	0.012

Coefficiente Kr

U	-1.04
SN	0.30
C	0.02
$b = -1/f_2$	-0.280505
Sh	1.00
δ	0.308356
k_r	0.813492

Coefficiente Kc

MATERIAL	Base asfáltica	Concreto asfáltico	Concreto asfáltico de alto módulo
k_c	1.3	1.1	1.0

Coefficiente Ks

MÓDULO	$E_{SR} < 50,000$ KPa	$50,000 \leq E_{SR} < 120,000$ Kpa	$E_{SR} \geq 120,000$ KPa
k_s	0.833333	0.909091	1.0

Subrasante : 999 Kgr. / cm²

A	0.016
N (ESAL)	7,200,000
ϵ_z (mm/mm) admisible	4.1143 E-04

DISEÑO AUTORES

AVENIDA 30 DE AGOSTO SECTOR 2 TRAMO 4

ANÁLISIS DE LOS ESFUERZOS DE TRABAJO

Selección del riesgo.

RIESGO DE DISEÑO	15%
VARIABLE NORMAL (u)	-1.04

Esfuerzo de trabajo a tensión en parte inferior de la capa asfáltica.

FUNCIÓN	Das & Pandey (India)
f_1	2,657.8721
f_2	3.5650
f_3	1.4747
N (ESAL)	4,000,000
WMAAT (°C)	
Tmix (°C)	25.0
E_{AC} (KPa)	14,500,000
ϵ_t (mm/mm)	-1.6626E-04

ϵ_t (mm/mm)		-1.6626E-04
k_r		0.81349189
k_c		1.1
k_s		0.909091
ϵ_t (mm/mm) admisible		-1.3525 E-04

Esfuerzo de trabajo a compresión en la Parte superior de la subrasante.

Coficiente A

TPDA Comercial / Carril diseño / Año 1	< 150	> = 150
A	0.016	0.012

Coficiente Kr

U	-1.04
SN	0.30
C	0.02
$b = -1/f_2$	-0.280505
Sh	1.00
δ	0.308356
k_r	0.813492

Coficiente Kc

MATERIAL	Base asfáltica	Concreto asfáltico	Concreto asfáltico de alto módulo
k_c	1.3	1.1	1.0

Coficiente Ks

MÓDULO	$E_{SR} < 50,000$ KPa	$50,000 \leq E_{SR} < 120,000$ Kpa	$E_{SR} \geq 120,000$ KPa
k_s	0.833333	0.909091	1.0

Subrasante : 1122 Kgr. / cm²

A	0.016
N (ESAL)	7,200,000
ϵ_z (mm/mm) admisible	4.1143 E-04

Cuadro 24

RESUMEN DE ESFUERZOS ADMISIBLES
PROYECTO: AVENIDA 30 DE AGOSTO
MÉTODO EMPÍRICO – MECANICISTA FRANCÉS
ADAPTACIÓN ING. LUIS RICARDO VÁSQUEZ V.

TRAMO	SECTOR 1			SECTOR 2				UNIDADES
	1	2	3	1	2	3	4	
TRÁNSITO	1.45 x 10 ⁷	1.45 x 10 ⁷	1.45 x 10 ⁷	1.45 x 10 ⁷	1.45 x 10 ⁷	1.45 x 10 ⁷	1.45 x 10 ⁷	ESAL
TEMPERATURA MIX (°C)	25°C	25°C	25°C	25°C	25°C	25°C	25°C	°C
Eca	4'000.000	4'000.000	4'000.000	4'000.000	4'000.000	4'000.000	4'000.000	KPa
Kr	0.813491	0.813491	0.813491	0.813491	0.813491	0.813491	0.813491	
Kc	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	
Ks	1 / 1.0	1 / 1.2	1 / 1.0	1 / 1.0	1 / 1.1	1 / 1.1	1 / 1.1	
et (DAS Y PANDEY)	1.66 x 10 ⁻⁴	1.66 x 10 ⁻⁴	1.66 x 10 ⁻⁴	1.66 x 10 ⁻⁴	1.66 x 10 ⁻⁴	1.66 x 10 ⁻⁴	1.66 x 10 ⁻⁴	mm/mm
et admisible	1.49 x 10 ⁻⁴	1.24 x 10 ⁻⁴	1.49 x 10 ⁻⁴	1.49 x 10 ⁻⁴	1.35 x 10 ⁻⁴	1.35 x 10 ⁻⁴	1.35 x 10 ⁻⁴	mm/mm
ez admisible	4.11 x 10 ⁻⁴	4.11 x 10 ⁻⁴	4.11 x 10 ⁻⁴	4.11 x 10 ⁻⁴	4.11 x 10 ⁻⁴	4.11 x 10 ⁻⁴	4.11 x 10 ⁻⁴	mm/mm

Cuadro 25

RESUMEN DE DISEÑO AUTORES
PROYECTO: AVENIDA 30 DE AGOSTO
PROGRAMA : DEPAV

	SECTOR 1	SECTOR 1	SECTOR 1	SECTOR 2	SECTOR 2	SECTOR 2	SECTOR 2	
TRAMO	1	2	3	1	2	3	4	UNIDADES
ESFUERZOS ADMISIBLES								
ϵ_t	1.49×10^{-4}	1.24×10^{-4}	1.49×10^{-4}	1.49×10^{-4}	1.35×10^{-4}	1.35×10^{-4}	1.35×10^{-4}	mm/mm
ϵ_z	4.11×10^{-4}	4.11×10^{-4}	4.11×10^{-4}	4.11×10^{-4}	4.11×10^{-4}	4.11×10^{-4}	4.11×10^{-4}	mm/mm
MÓDULO SOBRECARPETA	40788.65	40788.65	40788.65	40788.65	40788.65	40788.65	40788.65	Kgr/cm ²
ESPELOR SOBRECARPETA	10.00	17.00	11.00	13.00	16.00	15.50	15.00	cm
CONDICIÓN DE LIGA	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	
MÓDULO FRESADO	6118.30	6118.30	6118.30	6118.30	6118.30	6118.30	6118.30	Kgr/cm ²
ESPELOR FRESADO	15.00	15.00	15.00	12.00	12.00	12.00	12.00	cm
CONDICIÓN DE LIGA	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	
MÓDULO CAPA BASE	4894.64	3874.92	4588.72	2008.84	1060.51	1381.72	1748.81	Kgr/cm ²
ESPELOR CAPA BASE	25.00	25.00	25.00	30.00	30.00	30.00	30.00	cm
CONDICIÓN DE LIGA	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	
MÓDULO CAPA SUBBASE	3772.95	1529.57	2447.32					Kgr/cm ²
ESPELOR CAPA SUBBASE	20.00	20.00	20.00					cm
CONDICIÓN DE LIGA	NO	NO	NO					
MÓDULO SUBRASANTE	3314.08	367.10	1549.97	1448.00	999.32	999.32	1121.69	Kgr/cm ²
ESFUERZOS CALCULADOS								
ϵ_t	1.48×10^{-4}	1.23×10^{-4}	1.47×10^{-4}	1.47×10^{-4}	1.33×10^{-4}	1.34×10^{-4}	1.35×10^{-4}	mm/mm
ϵ_z	2.51×10^{-5}	6.30×10^{-5}	3.96×10^{-5}	4.34×10^{-5}	4.26×10^{-5}	4.55×10^{-5}	4.46×10^{-5}	mm/mm

OBSERVACIONES AL DISEÑO

AVENIDA 30 DE AGOSTO

1. El consultor utiliza las leyes de fatiga establecidas por Kerhoven y Dormon, y los criterios de Nottingham para encontrar los esfuerzos admisibles en la estructura.
2. Al corroborar los cálculos realizados por el consultor, se encuentra que la función de transferencia de Kerhoven y Dormon, para el criterio de falla por ahuellamiento, por medio del esfuerzo vertical por compresión σ_z , en la parte superior de la subrasante, está bien aplicado y calculado.
3. Al revisar los resultados presentados por el consultor para el cálculo de la deformación unitaria por tensión ϵ_t , en la parte inferior de la capa asfáltica, la función de transferencia de NOTTINGHAM, que se supone es la utilizada por él, no arroja los valores con los cuales chequea el diseño. En vista de esto, los autores tratan de encontrar dichos valores con otras funciones de transferencia y no pudieron hallarlos. (Ver Cuadro 26)

4. El diseño del consultor no cumple siquiera con confiabilidad del 50%, al hallar los valores de ϵ_t con las siguientes funciones de transferencia CRR (Bélgica), HUDSON, ROADENT y DAS & PANDEY, por lo tanto ϵ_t está mal calculado.

Cuadro 26

CUADRO COMPARATIVO DE ϵ_t

Tramo/Función	SECTOR 1			SECTOR 2			
	1	2	3	1	2	3	4
DISENOCONS.	2.93×10^{-4}	2.96×10^{-4}	3.06×10^{-4}	3.21×10^{-4}	3.03×10^{-4}	2.99×10^{-4}	3.32×10^{-4}
ADM. CONS.	3.87×10^{-4}	3.87×10^{-4}	3.87×10^{-4}	3.87×10^{-4}	3.87×10^{-4}	3.87×10^{-4}	3.87×10^{-4}
NOTTINGHAM	1.39×10^{-4}	1.39×10^{-4}	1.39×10^{-4}	1.39×10^{-4}	1.39×10^{-4}	1.39×10^{-4}	1.39×10^{-4}
CRR	5.81×10^{-5}	5.81×10^{-5}	5.81×10^{-5}	5.81×10^{-5}	5.81×10^{-5}	5.81×10^{-5}	5.81×10^{-5}
HUDSON	1.23×10^{-4}	1.23×10^{-4}	1.23×10^{-4}	1.23×10^{-4}	1.23×10^{-4}	1.23×10^{-4}	1.23×10^{-4}
ROADENT	1.35×10^{-4}	1.35×10^{-4}	1.35×10^{-4}	1.35×10^{-4}	1.35×10^{-4}	1.35×10^{-4}	1.35×10^{-4}
DAS&PANDEY	1.66×10^{-4}	1.66×10^{-4}	1.66×10^{-4}	1.66×10^{-4}	1.66×10^{-4}	1.66×10^{-4}	1.66×10^{-4}

Se resalta que ϵ_t está mal calculado, y el diseño nunca cumple.

5. El consultor no da a conocer como halló el módulo de la carpeta asfáltica a utilizar como refuerzo, así como no explica por qué tomó los diferentes valores de módulos para la capa fresada.

6. El consultor fresa la carpeta asfáltica, junto con parte de la capa granular existente, lo cual no es muy recomendable por la heterogeneidad del material, debido a los diferentes procedimientos constructivos, además tal como lo dice el autor este material no es de muy buena calidad.

7. A lo largo de todo el sector 1, el consultor modela con 12 centímetros, pero al diseñar el refuerzo toma 15 centímetros de carpeta asfáltica para fresar, tal como muestra el perfil de estructura existente dado por él mismo, además modela con 45 centímetros de capa granular, pero en la rehabilitación sólo aparecen 42 centímetros, sin explicar que pasó con la diferencia.

8. Las rehabilitaciones planteadas por el consultor para: sectores 1 tramo 2, sector 2 tramos 3 y 4, son bastante complicadas de ejecutar, por el gran número de actividades con un mismo material, como es fresar la carpeta, retirar parte del material existente, mezclar base granular en la misma cantidad que se retiró de material granular, con el RAP obtenido, para finalmente extender y compactar en 2 capas.

9. En el sector 2 tramos 1 y 4, el consultor modela con 12 centímetros, pero al diseñar el refuerzo toma 13 centímetros de carpeta asfáltica para fresar, el perfil de estructura existente dado por él mismo sólo tiene 12 centímetros.

10. Se propone como solución de rehabilitación la construcción de sobrecarpeta de diferentes espesores, sobre la capa asfáltica existente, después de haber sido a fresada en su totalidad con el fin de evitar la reflexión de grietas, además de mejorar el comportamiento.

11. La solución planteada por los autores es mas sencilla de construir, pues se hace mecánicamente, y en un solo paso, mientras tanta manipulación de los materiales lo hace muy costoso y demorado, además de la gran incomodidad generada a los usuarios, pues como se puede ver, es una vía de alto tráfico (14'500.000 ESAL).

COMPARACIÓN RESULTADOS DE DISEÑO

AVENIDA 30 DE AGOSTO

SECTOR 1 – TRAMO 1

DISEÑO CONSULTOR

(C.A.) Eca = 15000 Kgr / cm ²	L	10 cm
(B.G.) Ebg = 3233 Kgr / cm ²	N	20 cm
(C.G.) Ecg = 1399 Kgr / cm ²	N	40 cm
(S.R.) Esr = 649 Kgr / cm ²		

DISEÑO AUTORES

(C.A.) Eca = 40788.65 Kgr / cm ²	L	10 cm
(C.F.) Ebg = 6118.30 Kgr / cm ²	N	15 cm
(B.G.) Ebg = 4894.64 Kgr / cm ²	N	25 cm
(SB.G.) Esbg = 3772.95 Kgr / cm ²	N	20 cm
(S.R.) Esr = 3314.08 Kgr / cm ²		

AVENIDA 30 DE AGOSTO –

SECTOR 1 – TRAMO 2

DISEÑO CONSULTOR

(C.A.) Eca = 15000 Kgr / cm ²	L	10 cm
(B.G.) Ebg = 2805 Kgr / cm ²	N	30 cm
(C.G.) Ecg = 928 Kgr / cm ²	N	30 cm
(S.R.) Esr = 383 Kgr / cm ²		

DISEÑO AUTORES

(C.A.) Eca = 40788.65 Kgr / cm ²	L	17 cm
(C.F.) Ebg = 6118.30 Kgr / cm ²	N	15 cm
(B.G.) Ebg = 3874.92 Kgr / cm ²	N	25 cm
(SB.G.) Esbg = 1529.57 Kgr / cm ²	N	20 cm
(S.R.) Esr = 367.10 Kgr / cm ²		

AVENIDA 30 DE AGOSTO

SECTOR 1 – TRAMO 3

DISEÑO CONSULTOR

(C.A.) Eca = 15000 Kgr / cm ²	L	10 cm
(B.G.) Ebg = 3075 Kgr / cm ²	N	20 cm
(C.G.) Ecg = 1295 Kgr / cm ²	N	40 cm
(S.R.) Esr = 574 Kgr / cm ²		

DISEÑO AUTORES

(C.A.) Eca = 40788.65 Kgr / cm ²	L	11 cm
(C.F.) Ebg = 6118.30 Kgr / cm ²	N	15 cm
(B.G.) Ebg = 4588.72 Kgr / cm ²	N	25 cm
(SB.G.) Esbg = 2447.32 Kgr / cm ²	N	20 cm
(S.R.) Esr = 1549.97 Kgr / cm ²		

AVENIDA 30 DE AGOSTO –

SECTOR 2 – TRAMO 1

DISEÑO CONSULTOR

(C.A.) Eca = 15000 Kgr / cm ²	L	10 cm
(B.G.) Ebg = 2912 Kgr / cm ²	N	20 cm
(C.G.) Ecg = 1192 Kgr / cm ²	N	27 cm
(S.R.) Esr = 574 Kgr / cm ²		

DISEÑO AUTORES

(C.A.) Eca = 40788.65 Kgr / cm ²	L	13 cm
(C.F.) Ecf = 6118.30 Kgr / cm ²	N	12 cm
(C.G.) Ecg = 2008.84 Kgr / cm ²	N	30 cm
(S.R.) Esr = 1448.00 Kgr / cm ²		

AVENIDA 30 DE AGOSTO –

SECTOR 2 – TRAMO 2

DISEÑO CONSULTOR

(C.A.) Eca = 15000 Kgr / cm ²	L	10 cm
(B.G.) Ebg = 2438 Kgr / cm ²	N	20 cm
(C.G.) Ecg = 775 Kgr / cm ²	N	27 cm
(S.R.) Esr = 344 Kgr / cm ²		

DISEÑO AUTORES

(C.A.) Eca = 40788.65 Kgr / cm ²	L	16 cm
(C.F.) Ecf = 6118.30 Kgr / cm ²	N	12 cm
(C.G.) Ecg = 1060.51 Kgr / cm ²	N	30 cm
(S.R.) Esr = 999.32 Kgr / cm ²		

AVENIDA 30 DE AGOSTO –

SECTOR 2 – TRAMO 3

DISEÑO CONSULTOR

(C.A.) Eca = 15000 Kgr / cm ²	L	10 cm
(B.G.) Ebg = 2781 Kgr / cm ²	N	30 cm
(C.G.) Ecg = 941 Kgr / cm ²	N	20 cm
(S.R.) Esr = 450 Kgr / cm ²		

DISEÑO AUTORES

(C.A.) Eca = 40788.65 Kgr / cm ²	L	15.5 cm
(C.F.) Ecf = 6118.30 Kgr / cm ²	N	12 cm
(C.G.) Ecg = 1381.72 Kgr / cm ²	N	30 cm
(S.R.) Esr = 999.32 Kgr / cm ²		

AVENIDA 30 DE AGOSTO

SECTOR 2 – TRAMO 4

DISEÑO CONSULTOR

(C.A.) Eca = 15000 Kgr / cm ²	L	10 cm
(B.G.) Ebg = 2791 Kgr / cm ²	N	20 cm
(C.G.) Ecg = 1119 Kgr / cm ²	N	27 cm
(S.R.) Esr = 522 Kgr / cm ²		

DISEÑO AUTORES

(C.A.) Eca = 40788.65 Kgr / cm ²	L	15 cm
(C.F.) Ecf = 6118.30 Kgr / cm ²	N	12 cm
(C.G.) Ecg = 1748.81 Kgr / cm ²	N	30 cm
(S.R.) Esr = 1121.69 Kgr / cm ²		

4. PAUTAS PARA UNA MODELACION ADECUADA

a) Recopilación de la mayor cantidad de información existente acerca de la vía a rehabilitar: estudios anteriores con sus diseños y rehabilitaciones si ha tenido.

b) Evaluación de la estructura. Cubre tres aspectos: Deflectometría, Inventario de daños y exploración geotécnica.

La primera labor de campo puede ser la deflectometría. En nuestro país se realiza generalmente con viga Benkelman por costos y facilidad de consecución y maniobrabilidad. Se debe realizar por lo menos cada 25 metros lineales por el carril que se considere tenga mayores daños. Debe vigilarse el correcto funcionamiento de la viga Benkelman.

La segunda actividad de campo que se debe realizar es el inventario de daños, el cual debe ser bien detallado, acertado y de acuerdo con un manual de daños. Esta labor debe ser ejecutada por personal bien capacitado.

Luego de tener los resultados de los ensayos anteriores, se procede a realizar la exploración geotécnica, programada con base en la información deflectométrica y de daños. Debe realizarse un sondeo por cada 250 metros lineales de vía en estudio. Deben realizarse perfiles estratigráficos y un cuadro resumen con el fin de poder sectorizar apropiadamente.

La información y ensayos que se deben recolectar y realizar en las diferentes capas son:

Carpeta: Espesor, Densidad, Granulometría, Porcentaje de Asfalto.

Capas granulares: Densidad, Espesor, Humedad natural, Granulometría, Límite líquido, Límite plástico, Equivalente de Arena, Proctor, C.B.R.

Subrasante: C.B.R., Densidad, Clasificación SUCS y AASHTO, Humedad natural.

c) Cálculo de los ejes equivalentes que se asume ocurrirán en el período de diseño.

d) Con los datos de campo de la evaluación deflectométrica, se alimenta el programa DEFLEX del paquete INPACO u otra aplicación de análisis matemático. Al sectorizar se debe vigilar que los tramos sean más homogéneos que la longitud total del proyecto.

e) Se hace una sectorización con base en la deflectometría, daños y características geotécnicas del proyecto.

f) Al tener sectores definidos, si es el caso, se puede iniciar la modelación con el programa KENLAYER o UNALCAPA, encontrando los D_0 y D_{25} objetivos, o el D_0 y el R_c en el programa DEPAV, usando las curvas elaboradas a partir del estudio del radio de curvatura utilizando las aplicaciones DEPAV – ALIZE III y KENLAYER (Vásquez, 2000). Hay que tener en cuenta por cual método se realizará la rehabilitación, para así escoger las deflexiones objetivo. Se recomienda utilizar el método empírico - mecanicista francés, teniendo como objetivo las deflexiones que se encuentren en la cartera de campo lo más cercanas posible a la deflexión promedio.

La modelación con base en deflectometría de viga Benkelman tiene valores de módulo de carpeta definidos de acuerdo con el estado en que se encuentra. Buena: 13000 Kgr/cm², Regular: 5000 Kgr/cm² y Mala: 1400 Kgr/cm².

Estos valores no se deben variar como tampoco modificar el espesor de cualquiera de las capas.

Para iniciar la modelación se puede utilizar un módulo semilla basado en el CBR de la subrasante y con las fórmulas del USCOE, encontrar los módulos semillas de las capas granulares.

g) Finalmente, luego de haber modelado y calculado las deformaciones admisibles de acuerdo con el método empírico – mecanicista francés, con la función de transferencia que considere más se adapte a las condiciones en que se encuentra la vía en estudio, se procede al diseño de las rehabilitaciones.

Se recomienda el uso de la función de Das & Pandey, puesto que fue encontrada en la India, y de acuerdo con los estudios del Banco Mundial se pueden equiparar las condiciones de tránsito y clima con Colombia, ya que gran parte del programa HDM, fue desarrollado en ese país, y es aceptado por dicho organismo para la evaluación en Colombia.

Las otras funciones han sido encontradas en países desarrollados, con condiciones muy diferentes a las del nuestro, específicamente en la agresividad del tránsito, la tolerancia del usuario a los daños en la vía y los procesos de congelamiento y descongelamiento de la subrasante.

Se diseña la rehabilitación con el método empírico-mecanicista en el programa DEPAV, del paquete INPACO, por su facilidad de manejo, rapidez y buena precisión. No se deben modificar los módulos y los espesores encontrados en la modelación, y encontrar la temperatura de la mezcla de acuerdo a la correlación que hace el USCOE de esta temperatura con la ambiental.

5. CONCLUSIONES

- En algunas de las modelaciones de los estudios se encontró que las deflexiones que alimentaron el modelo teórico no corresponden a las condiciones bajo las cuales fueron realizadas las medidas en el sitio.
- En términos generales se observó un mal uso de la información geotécnica, porque se modificaron los espesores encontrados en campo y los resultados de los ensayos de laboratorio correspondientes, con el propósito de forzar el modelo.
- Los diseñadores de proyectos nuevos o de rehabilitación viales deben considerar y evaluar más de una metodología de diseño para efectuar comparaciones que ayuden a definir un diseño adecuado.
- En Colombia no se han efectuado estudios para obtener funciones de transferencia. La función de transferencia que se utilizó en el presente estudio es la menos conservadora y aún así redundante en considerables espesores de concreto asfáltico. Es conveniente ajustar la función de transferencia a condiciones locales y se invita a la ingeniería nacional para realizar investigaciones sobre este tema.

- Una incorrecta modelación conlleva un inadecuado diseño, derivando en sobrecostos de las obras de pavimentación por sobrediseño o falla prematura y afectando los tiempos de duración de las rehabilitaciones o nuevos pavimentos. Las entidades de control deben efectuar revisión a los estudios para verificar su buena elaboración y la viabilidad de su ejecución.
- Los diferentes métodos de diseño de rehabilitación fueron mal utilizados por los consultores.
- Los consultores diseñan rehabilitaciones sin tener muy en cuenta la parte constructiva, encontrando que sus propuestas son bastante complicadas de ejecutar en la vía, sea por procedimiento o por costos.

BIBLIOGRAFIA

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAYS AND TRANSPORTATION OFFICIALS. Guide for Design of Pavement Structures. AASHTO.USA.1993

BARKER W.R., BRABSTON W. N., CHOI Y.T. "A General System for the Structural Design of Flexible Pavements". Cuarta Conferencia Ann Arbor, USA. 1977.

DAS, Animesh y PANDEY B.B. Mechanistic-Empirical Design of Bituminous Road: An Indian Perspective. Journal of Transportation Engineering. October 1999.

HUANG, Yang H. Pavement Análisis and Design. Prentice Hall Inglewood, USA.1993.

Joint Departamentos of the Army and Air Force, TM-5-822-13/AFJMAN 32 – 1018 Pavement Design for Roads,Streets and Open Storage Areas, Elastic Layered Method, October, 1994.

LCPC-SETRA. French Design Manual for Pavement Structures. LCPC. France.1997.

LILLI Felix J. Curso sobre Diseño Racional de Pavimentos Flexibles. Universidad del Cauca. Popayán, Colombia. 1991.

MURGUEITIO VALENCIA, Alfonso. Metodología para la Realización de Estudios de Rehabilitación de Pavimentos Flexibles. Universidad del Cauca. Popayán, Colombia. 1997.

SÁNCHEZ SABOGAL, Fernando. Modelación de Pavimentos Asfálticos con el Programa DEPAV. Una Década de Desaciertos. Instituto Nacional de Vías. Colombia. 2001.

SHELL INTERNATIONAL PETROLEUM COMPANY LIMITED. "Shell Pavement Design Manual". Londres, 1978.

UNIVERSIDAD DEL CAUCA, Manual para el manejo del programa DEPAV, Popayán, 1992.

VASQUEZ VARELA, Luis Ricardo. Notas sobre Diseño de Pavimentos Flexibles. Universidad Nacional de Colombia. Manizales. Colombia. 2002.

— — — — — — — — — Estudio del Radio de Curvatura en la Modelación de Estructuras de Pavimento Flexible utilizando las Aplicaciones DEPAV – ALIZE III Y KENLAYER. Universidad Nacional de Colombia. Manizales. Colombia. 2000.

— — — — — — — — — Programa Unalcapa. Interface para Windows 9X del motor de cálculo JULEA de la Federal Aviation Administration. Manizales. Colombia, 2002.

— — — — — — — — — Programa AASHTO 93 Cálculo de las Ecuaciones AASHTO 1993. Manizales. Colombia, 2000.

AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN VÍA PEREIRA – MARSELLA K8+500 – K15+500. Gobernación de Risaralda. Pereira. Colombia. Marzo de 2000.

ESTUDIOS PARA LA REHABILITACIÓN DE LA VÍA LA VIRGINIA – ASIA PR
25+000 AL 31+000. Instituto Nacional de Vías. Bogotá. Colombia. Septiembre de
2000.

REHABILITACIÓN AVENIDA 30 DE AGOSTO. Area Metropolitana Centro
Occidente. Pereira. Marzo de 2001.

ANEXOS

CORRIDAS PROGRAMAS

**PROYECTO
PEREIRA - MARSELLA**

CORRIDAS PROGRAMAS

**PROYECTO
CERRITOS - CAUYÁ**

CORRIDAS PROGRAMAS

**PROYECTO
AVENIDA 30 DE AGOSTO**