

Obtención de un modelo computacional con el software SIGMA/W, para reproducir los resultados del ensayo con la viga Benkelman.

Obtaining a computational model with SIGMA/W software to reproduce the test results with the Benkelman beam.

MSc. Ing. Reynier Moll Martínez

Profesor Asistente

Departamento de Ingeniería Vial. Grupo de Investigación de Pavimentos y Explanaciones. Facultad de Ingeniería Civil. Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría” (CUJAE). La Habana, Cuba.

Teléfono: (537) 266-3494 y 266-3312 E-mail: reymoll@civil.cujae.edu.cu

Dr. Ing. Eduardo Tejeda Piusseaut

Profesor Titular

Departamento de Ingeniería Vial. Grupo de Investigación de Pavimentos y Explanaciones. Facultad de Ingeniería Civil. Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría” (CUJAE). La Habana, Cuba.

Teléfono: (537) 266-3490 y 266-3312 E-mail: etejeda@civil.cujae.edu.cu

Recibido: 14-02-14

Aceptado: 11-03-14

Resumen:

Entre los principales métodos para el diseño de los pavimentos están los empíricos-mecanicistas que utilizan la teoría del retrocálculo. Esta teoría permite caracterizar los materiales de las capas del pavimento y evaluar el comportamiento resistente de la estructura con la ayuda de la modelación computacional.

En el trabajo se evalúan varios modelos geométricos para seleccionar con cuál se obtienen los resultados que más se aproximan a los logrados mediante el ensayo con la viga Benkelman.

MSc. Ing. Reynier Moll Martínez, Dr. Ing. Eduardo Tejeda Piusseaut. Obtención de un modelo computacional con el software SIGMA/W, para reproducir los resultados del ensayo con la viga Benkelman.

La modelación se realizó con el software SIGMA/W; empleando la información de estudio de suelos realizada con el Penetrómetro Dinámico de Cono (DCP del inglés Dynamic Cone Penetrometer), en el primer proyecto de reciclado con asfalto espumado realizado en Cuba. Se consideró un modelo lineal-elástico, y la magnitud de cargas que reconoce la norma cubana de diseño de pavimentos flexibles (NC: 334/2004) [1]. Los resultados de la modelación se compararon con la información de la evaluación deflectométrica realizada a la vía en cuestión.

Los resultados demuestran la posibilidad de simplificar el número de mediciones con la viga Benkelman; además, el modelo geométrico obtenido puede ser parte del procedimiento a proponer para el diseño de pavimentos reciclados en frío, en Cuba.

Palabras clave: Empíricos-mecanicistas, Modelación computacional, Reciclado.

Abstract:

Among the principal methods for the design of pavements are mechanistic-empirical they use the backcalculation theory. This theory allows to characterize the materials of the pavement layers and evaluate the resistant behavior of the structure with the assistance of computer modeling.

In this paper are evaluated different computational models to select which results that approximate those achieved by testing the Benkelman beam is obtained.

The modeling was performed with the SIGMA/W software, using the soil study information performed with the Dynamic Cone Penetrometer (DCP Dynamic Cone Penetrometer English) in the first project with foamed asphalt recycling done in Cuba. was considered a linear-elastic model, and magnitude of loads that recognizes the Cuban norm of flexible pavement design (NC: 334/2004). The modeling results were compared with the information of the deflectométrica evaluation of the road in question.

The results demonstrate the possibility of simplifying the measurement number with the Benkelman beam, in addition, the obtained geometric model can be part of the procedure to proposing in Cuba, for the design of cold recycled pavements.

Keywords: Empirical-mechanistic, Computational modeling, Recycling

1. Introducción:

Determinar las propiedades mecánicas de los materiales de la zona donde vaya a ejecutarse una obra vial y evaluar su comportamiento ante los esfuerzos a que serán sometidos durante su vida útil, requiere de pruebas o ensayos que generalmente son costosos. El estudio de las características de los suelos puede ejecutarse mediante ensayos in situ o en laboratorio.

Para evaluar la condición estructural de un pavimento asfáltico es necesario analizar sus parámetros funcionales y estructurales; considerándose como los más importantes, la capacidad portante de la estructura, determinado a través de los valores de deflexiones y deformaciones que ocurren ante la acción de una determinada magnitud de carga. Para ello el método más generalizado a nivel mundial es

MSc. Ing. Reynier Moll Martínez, Dr. Ing. Eduardo Tejeda Piusseaut. Obtención de un modelo computacional con el software SIGMA/W, para reproducir los resultados del ensayo con la viga Benkelman.

la medida de las deflexiones en la superficie. Esta deflexión representa una respuesta total del sistema constituido por la estructura y la subrasante, ante la aplicación de una carga externa [2].

Los equipos y/o procedimientos que con mayor frecuencia se emplean para el conocimiento de las deflexiones del pavimento son: viga Benkelman, el ensayo de Carga con Placa, y los Deflectómetros de Impacto. Con la realización de este tipo de pruebas se logra una mayor representatividad del material existente en el terreno; aunque, para reducir los costos y los trabajos de campo, es posible realizarlas con la ayuda de la modelación computacional como herramienta de cálculo.

Para el diseño de los pavimentos, se ha generalizado el empleo de programas computacionales que permiten determinar parámetros como las deformaciones y esfuerzos a los que estará sometida la estructura. La práctica generalizada es suponer un problema estático y materiales elástico-lineales (modelo de respuesta de tipo multicapa lineal elástico de Burmister). Las variables de entrada que se emplean son: la carga de tráfico que actúa sobre la estructura, el módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson y el espesor de las capas componentes.

No obstante la utilidad que representa su fácil aplicación, en el proceso de análisis se introducen simplificaciones que pueden llevar a una interpretación errónea del problema; por lo que un factor determinante en la calidad de los resultados es la experiencia del especialista que realiza el estudio.

1. Materiales y métodos:

1.1. Datos generales del proyecto de estudio. [3, 4]

El análisis se realizó con la información del proyecto de rehabilitación de 31km de la carretera Holguín – Guardalavaca donde la solución aplicada fue el reciclado con asfalto espumado. Para la evaluación de la vía y ejecución del reciclado la carretera fue dividida en 5 secciones; aunque para este trabajo sólo se empleó la información correspondiente a las secciones 2 y 4.

En la determinación de la resistencia de las capas de materiales que formaban la estructura original se empleó el DCP (Penetrómetro Dinámico de Cono). La metodología seguida consistió en remover la capa asfáltica comenzando el ensayo aproximadamente 200mm por debajo de la superficie de la carretera para garantizar que se sobrepase el espesor de la capa asfáltica; y los sondeos se realizaron hasta una profundidad de 800mm.

Según los resultados iniciales, la capa asfáltica se encontraba muy rígida debido al envejecimiento del asfalto. El espesor de esta capa variaba entre 30mm y 150mm, con un promedio entre 70mm y 90mm. La base, la subbase y la subrasante están compuestas por gravas serpentinas.

Se realizó el estudio deflectométrico, mediante la viga Benkelman, para determinar la deflexión elástica recuperada en la superficie del pavimento existente. Para el ensayo se utilizó un camión pipa de dos ejes simples, con ruedas duales en su eje trasero, con peso de 13 toneladas y presión de inflado de 0,7MPa; corrigiéndose los resultados por temperatura.

MSc. Ing. Reynier Moll Martínez, Dr. Ing. Eduardo Tejeda Piusseaut. Obtención de un modelo computacional con el software SIGMA/W, para reproducir los resultados del ensayo con la viga Benkelman.

1.2. Estaciones seleccionadas.

Para la selección de las estaciones se consideraron los siguientes criterios:

1. Fijar una cifra de estaciones estadísticamente significativa, por lo que se seleccionaron un total de 20, 10 de cada sección.
2. Tomar estaciones donde se tuviera la información de las deflexiones medidas con la viga Benkelman y de espesores de capas y módulos de elasticidad determinados con el DCP.
3. Que la mayor cantidad de resultados de módulo de elasticidad de las capas determinados a partir de las mediciones con el DCP fueran valores en orden decreciente hacia la profundidad de la estructura.

Tabla 2.1. Estaciones seleccionadas para el estudio deflectométrico con el modelo computacional.

Sección	Estaciones									
2	44700	45000	45200	45300	45600	45700	45800	47000	47700	47900
4	29200	30000	30300	30500	31200	31800	32700	33300	33500	33600

1.3. Características de los materiales.

Los materiales de la estructura se caracterizan por el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson. Como coeficiente de Poisson se consideró 0,30 para la capa asfáltica y 0,35 para los materiales granulares; según los criterios que aparecen en [5-7] y debido a que la influencia de esta variable en el resultado final del modelo no es significativa [8].

En cuanto a los módulos de elasticidad, se fijó el valor que plantea la NC 334/2004 [1] para la capa asfáltica, donde $E=750\text{MPa}$; mientras que a las capas de material granular se les asignaron los valores obtenidos de las mediciones con el DCP. (Ver tablas 2.2 y 2.3)

Tabla 2.2. Módulos de elasticidad en la sección 2. Puente bajo el Cerro - Cuatro Palma.

Estacionado	Profundidad (mm)		
	200 - 400	400 - 600	600 - 800
	E (MPa)	E (MPa)	E (MPa)
44700	180	131	101
45000	224	189	101
45200	182	120	207
45300	191	202	182
45600	136	156	101
45700	113	113	131
45800	91	108	97
47000	144	108	144
47700	119	102	106
47900	142	95	128

MSc. Ing. Reynier Moll Martínez, Dr. Ing. Eduardo Tejeda Piusseaut. Obtención de un modelo computacional con el software SIGMA/W, para reproducir los resultados del ensayo con la viga Benkelman.

Tabla 2.3. Módulos de elasticidad en la sección 4. La Viuda-Puente sobre Río Cochico

Estacionado	Profundidad (mm)		
	200 – 400	400 – 600	600 – 800
	E (MPa)	E (MPa)	E (MPa)
29200	198	112	72
30000	304	217	71
30300	205	194	123
30500	338	309	120
31200	310	292	230
31800	143	123	114
32700	350	333	252
33300	225	85	71
33500	369	329	312
33600	236	207	146

1.4. Datos de las cargas.

En cuanto a las cargas, en el programa se introduce el valor de la presión de contacto igual a 0,7MPa. Fue necesario determinar el área en que se ejerce esa presión según la carga aplicada al pavimento. En el ensayo la proporciona una de las llantas dobles del eje trasero del camión (6,5ton), con la cual se determina el radio de la huella circular equivalente.

1.5. Información sobre el modelo físico desarrollado en SIGMA/W.

Para la modelación computacional se empleó el software GeoSlope del paquete SIGMA/W. Al igual que otros programas de elementos finitos, permite modelar diferentes problemas estructurales; considera varios modelos constitutivos para el material; diferentes configuraciones geométricas (condiciones de contorno, espesor variable); y cualquier número de cargas, con formas y presiones de contacto variables.

Cuando se aplica el método de los elementos finitos, para estudiar el comportamiento de los pavimentos, el modelo más utilizado es el axial-simétrico. Esto se fundamenta en su simplicidad [10], y porque el problema objeto de análisis se basa en la simetría radial de una carga circular aplicada sobre un macizo multicapa [9]. Por tanto, fue aplicado el modelo axial-simétrico; aunque, considerando que el Geoslope ofrece la posibilidad de realizar un análisis bidimensional se revisaron también los resultados que se obtendrían para este modelo.

1.5.1. Características del modelo geométrico

Al igual que para la selección de las estaciones, para construir el modelo geométrico se tuvieron en cuenta varias consideraciones; algunas de ellas a partir de los resultados del estudio con el DCP.

1. Se consideró una estructura compuesta por 4 capas, tres de material granular (MG) y una que representa la superficie asfáltica. (Figura 2.1)
2. Como el estudio con el DCP se realizó a una profundidad de 200mm por debajo de la superficie de la estructura hasta una profundidad de 800mm; y se consideró un espesor promedio para la capa asfáltica de 100mm, entonces las dimensiones de cada capa fueron: superficie asfáltica 100mm; MG-1 300mm; MG-2 200mm; y la MG-3 se asumió como infinita. Cada una de ellas ubicadas en orden descendente desde la superficie de la estructura.

Revista de Arquitectura e Ingeniería. 2014, vol.8 no.1 ISSN 1990-8830 / RNPS 2125

3. La geometría general fue la siguiente:

- ✓ Para el modelo axialsimétrico se planteó una sección de 2,5m de ancho por 2,5m de profundidad, teniendo en cuenta que en [9] se plantea que con elementos finitos el contorno debe situarse a una distancia suficientemente grande de forma que pueda considerarse como infinita para que no se afecte al área alrededor de la carga; determinándose que la respuesta estructural del pavimento para distancia a la carga superiores a 2,0m es prácticamente nula; por lo que definir un modelo con dimensiones iguales o superiores a esta longitud sería adecuado.
- ✓ Para el modelo axialsimétrico la dimensión en el eje X es de 2,5m; mientras que para el estudio de los modelos bidimensionales estas dimensiones fueron variables; pero siempre garantizando que la distancia del nodo en que se mediría la deformación al borde del modelo fuese superior a los 2,0m.
- ✓ Tanto para el modelo axialsimétrico como para el bidimensional se limitaron los desplazamientos horizontales y verticales en sus bordes.
- ✓ La sección de los elementos finitos serían de 5cm x 5cm.
- ✓ Para todos los casos la distancia en la que estará aplicada la carga, que no es más que el radio de la huella de la carga, se aproximó a múltiplo de 5 para lograr una correspondencia con el tamaño definido para los elementos finitos; de lo contrario, el programa no permite la representación de la carga.

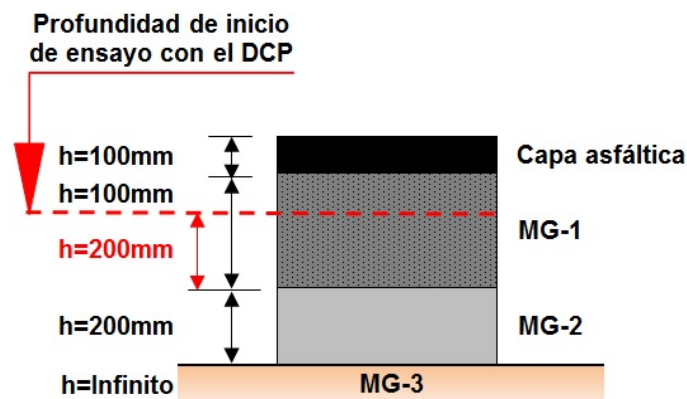


Figura 2.1. Representación de la estructura de pavimento modelada.
Fuente: Elaborada por el autor

1.5.2. Configuración de los casos de estudio.

- ✓ **Caso I:** Modelo axialsimétrico con radio equivalente.

El modelo geométrico confeccionado trata de reproducir la acción de dos ruedas gemelas llevándolo a uno de radio equivalente de un camión cargado. Considerando que la carga que trasmite el camión a la superficie del pavimento por el eje trasero es de 13 toneladas, entonces a cada lado del eje le corresponden 6,5 toneladas; con una presión de inflado de 0,7MPa. Para este caso se transforman los dos neumáticos de un lado del eje a uno de radio equivalente. El valor obtenido se corresponde con la distancia en la que estará distribuida la carga en el programa SIGMA/W.

MSc. Ing. Reynier Moll Martínez, Dr. Ing. Eduardo Tejeda Piusseaut. Obtención de un modelo computacional con el software SIGMA/W, para reproducir los resultados del ensayo con la viga Benkelman.

$$r = \sqrt{\frac{P}{p \cdot \pi}} \quad (1)$$

Siendo “P” la carga actuante; y “p” la presión de inflado del neumático; entonces:

$$r = \sqrt{\frac{6500}{7 \cdot \pi}} = 17,20\text{cm}$$

El resultado es el radio circular de un área equivalente a la producida por la huella del neumático, provocada por una carga de 0,07kN/cm² (0,7MPa).

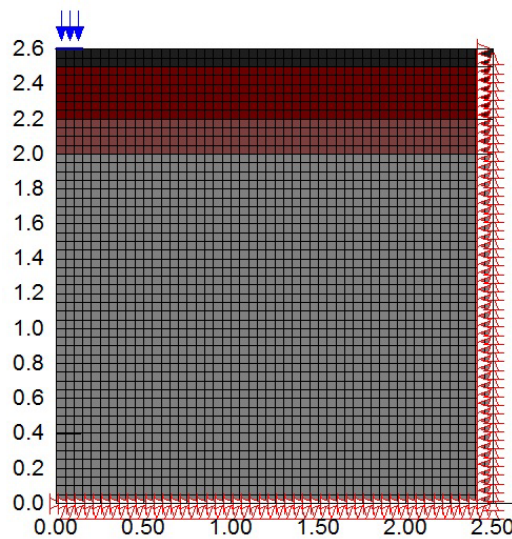


Figura 2.2. Modelo axialsimétrico en SIGMA/W.

Fuente: Elaborada por el autor

El valor de deformación que se analiza corresponde al nodo que se encuentra en el extremo superior izquierdo considerando que ese el punto donde se coloca la viga Benkelman durante el ensayo in situ.

✓ **Caso II:** Modelo bidimensional con dos cargas.

En este caso se representan en SIGMA los dos neumáticos por donde se transmite la carga a la estructura de pavimento. Si se conoce que a un lado del eje del camión le corresponde una carga de 6,5t, entonces por cada neumático se transmiten 3,25t. Con esta información se determinó el radio equivalente de cada neumático. Empleando la ecuación 1 se obtiene:

$$r = \sqrt{\frac{3250}{7 \cdot \pi}} = 12,15\text{cm} ; \text{ por tanto, el diámetro es igual a } 24,30\text{cm}$$

MSc. Ing. Reynier Moll Martínez, Dr. Ing. Eduardo Tejeda Piusseaut. Obtención de un modelo computacional con el software SIGMA/W, para reproducir los resultados del ensayo con la viga Benkelman.

Como resultado se tienen dos cargas de $0,07\text{kN/cm}^2$ ($0,7\text{MPa}$) distribuidas cada una en un área equivalente de $24,30\text{cm}$ de diámetro. La deformación es medida en el nodo que se ubica en el centro de las dos cargas. (Figura 2.3)

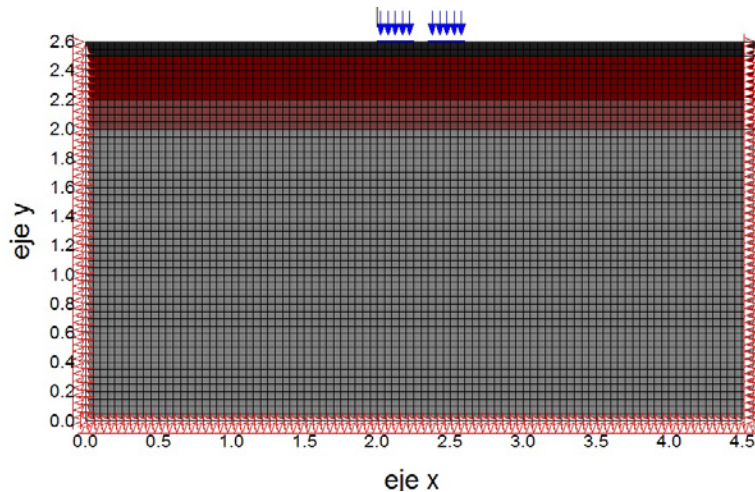


Figura 2.3. Modelo bidimensional en SIGMA/W con las dos cargas distribuidas cada una en una superficie de 25cm de diámetro y espaciadas entre si a 10cm .
Fuente: Elaborada por el autor

✓ **Caso III:** Modelo bidimensional con radio equivalente.

En este modelo para transformar los dos neumáticos en uno de radio equivalente se procedió de igual manera que en el “caso I” (figura 16). Empleando la ecuación 2.1 se obtuvo el valor del radio, en este caso como se analizaban los dos neumáticos entonces se trabajó con el diámetro equivalente:

$$r = \sqrt{\frac{6500}{7 \cdot \pi}} = 17,20\text{cm}$$

Con el valor de radio calculado, se obtiene una superficie de $34,40\text{cm}$ diámetro donde estará distribuida la carga. La deformación se mide en el centro de la superficie de aplicación de la carga. (Figura 2.4)

MSc. Ing. Reynier Moll Martínez, Dr. Ing. Eduardo Tejeda Piusseaut. Obtención de un modelo computacional con el software SIGMA/W, para reproducir los resultados del ensayo con la viga Benkelman.

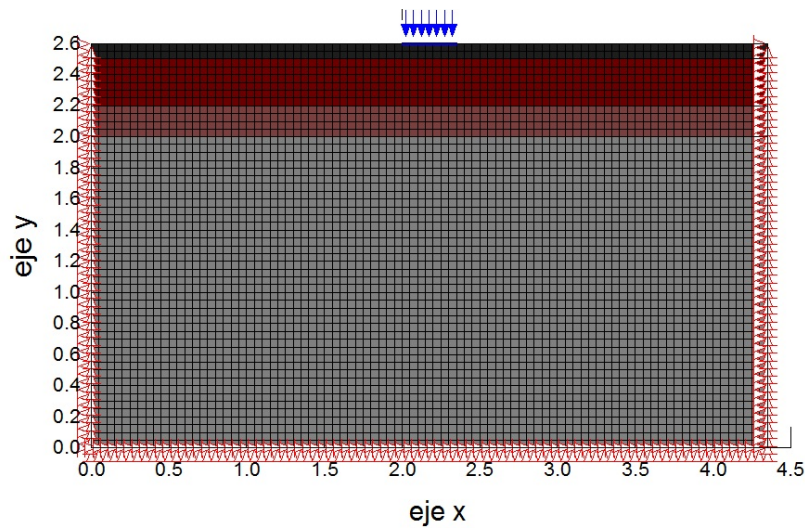


Figura 2.4. Modelo bidimensional en SIGMA/W con una carga distribuida en el diámetro del neumático de radio equivalente.
Fuente: Elaborada por el autor

2. Resultados y discusión:

Con los resultados de deformación obtenidos por estación y en cada sección, para los diferentes modelos computacionales desarrollados, se construyeron los gráficos de tendencia, figuras 3.1 y 3.2, para las secciones 2 y 4 respectivamente.

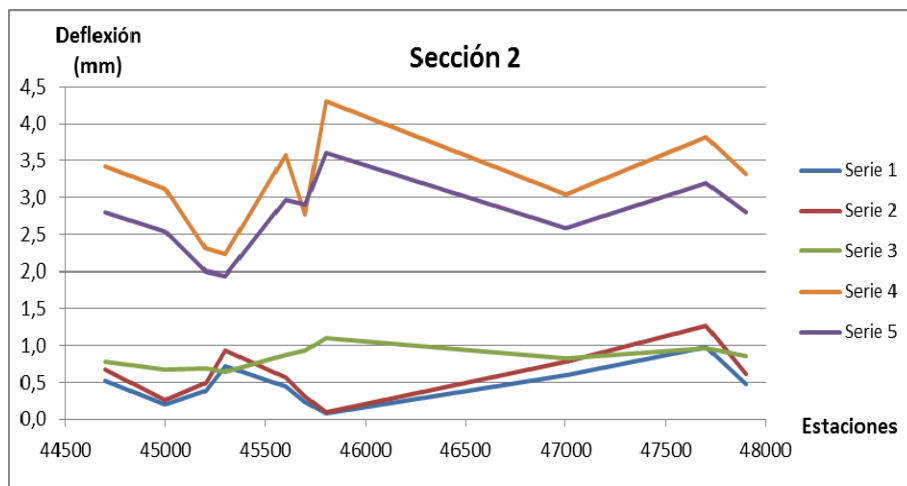


Figura 3.1. Gráfico de deflexiones en las estaciones seleccionadas de la sección 2.
Revista de Arquitectura e Ingeniería. 2014, vol.8 no.1 ISSN 1990-8830 / RNPS 2125

MSc. Ing. Reynier Moll Martínez, Dr. Ing. Eduardo Tejeda Piusseaut. Obtención de un modelo computacional con el software SIGMA/W, para reproducir los resultados del ensayo con la viga Benkelman.

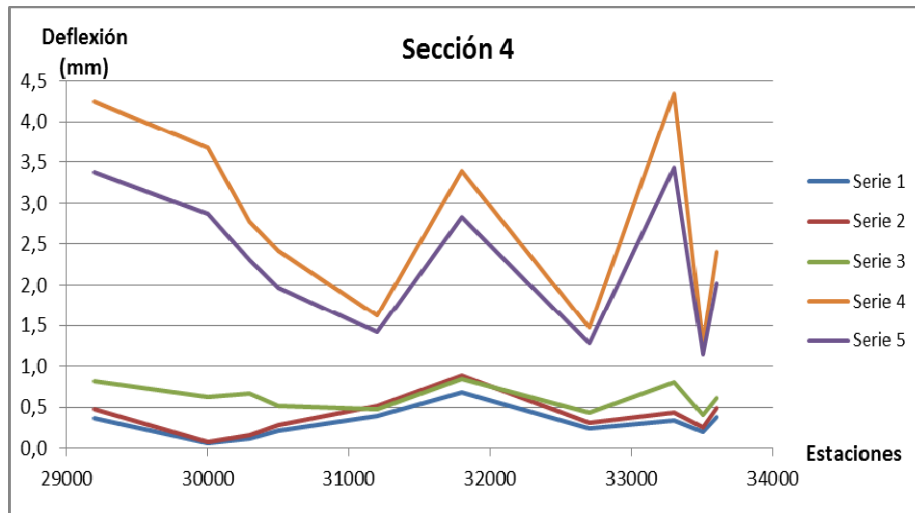


Figura 3.2. Gráfico de deflexiones en las estaciones seleccionadas de la sección 4.

Leyenda:

- Serie 1: Deflexión máxima obtenida in situ con la viga Benkelman.
- Serie 2: Deflexión máxima obtenida in situ con la viga Benkelman corregida.
- Serie 3: Deflexión obtenida en SIGMA para un modelo axialsimétrico con radio equivalente de 15cm.
- Serie 4: Deflexión obtenida en SIGMA para un modelo bidimensional con dos cargas.
- Serie 5: Deflexión obtenida en SIGMA para un modelo bidimensional con radio equivalente de 35cm.

De los resultados obtenidos se desprenden las siguientes valoraciones:

- a) En ambas secciones el modelo computacional que mejor se ajusta a la deformación obtenida in situ es el axial-simétrico de radio equivalente.
- b) Para el modelo axial-simétrico entre las dos secciones donde se muestra un mejor ajuste de la curva de deflexiones de SIGMA y las deflexiones medidas in situ es en la sección 4.
- c) En las dos secciones estudiadas las curvas que corresponden a los modelos bidimensionales tienen igual tendencia entre sí.
- d) Los valores de deflexión del modelo bidimensional con carga equivalente son superiores al bidimensional con dos cargas.
- e)

2.1. Análisis estadístico de los resultados.

La determinación de los errores es una manera de evaluar la correspondencia entre los resultados de deformación medidos in situ y los obtenidos de la modelación computacional y de utilidad para escoger el modelo que mejor se ajusta a la situación. Los criterios de error utilizados en el estudio son los mostrados a continuación (ecuaciones de la 2 a la 4):

MSc. Ing. Reynier Moll Martínez, Dr. Ing. Eduardo Tejeda Piusseaut. Obtención de un modelo computacional con el software SIGMA/W, para reproducir los resultados del ensayo con la viga Benkelman.

➤ Error medio cuadrático [11-14]:
$$\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - d_i)^2}{n} \quad (2)$$

➤ Desviación media absoluta:
$$\frac{\sum_{i=1}^n |D_i - d_i|}{n} \quad (3)$$

➤ Error medio absoluto:
$$\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{D_i - d_i}{D_i} \right)}{n} \quad (4)$$

Donde:

D_i : Valor de deflexión patrón o medida in situ en el punto i .

d_i : Valor de deflexión obtenida del modelo computacional en el punto i .

n : Total de puntos analizados.

Como valor de deflexión patrón para el estudio de errores se consideró la deflexión corregida. Los resultados del estudio de errores se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Resultado del estudio de errores para las dos secciones estudiadas.

Modelo	Sección 2			Modelo	Sección 4		
	Error medio cuadrático	Desviación media absoluta	Porcentaje de error medio absoluto		Error medio cuadrático	Desviación media absoluta	Porcentaje de error medio absoluto
I	0,20	0,23	1,43	I	0,09	0,23	1,38
II	7,21	2,59	0,18	II	6,76	2,38	10,39
III	4,92	2,13	6,94	III	4,12	1,87	8,19

Para escoger un modelo no se ha fijado un valor de por ciento de error aceptable. En caso que se utilice el valor del error medio cuadrático se plantea una tolerancia de error del 3% para que el estudio tenga éxito [15].

Tomando en cuenta el criterio anterior se confirma el modelo axialsimétrico de radio equivalente como el de mejores resultados.

3. Conclusiones:

- 1) La precisión de los resultados que se obtienen mediante la modelación computacional dependen en gran medida de la correcta información que se tenga sobre las capas del pavimento, acerca de las características resistentes de los materiales componentes, lo cual depende del método empleado para la investigación del estado del pavimento y sus materiales.

MSc. Ing. Reynier Moll Martínez, Dr. Ing. Eduardo Tejeda Piusseaut. Obtención de un modelo computacional con el software SIGMA/W, para reproducir los resultados del ensayo con la viga Benkelman.

- 2) En el modelo computacional la influencia de la carga para distancias superiores a los 2,00m es prácticamente nula, lo que corrobora los resultados de otros estudios.
- 3) Se obtuvo que el modelo computacional que más se aproxima a la deformación obtenida in situ es el axialsimétrico de radio equivalente, con un mejor ajuste obtenido en la sección 4.
- 4) El empleo de la modelación computacional para reproducir las mediciones deflectométricas, permiten facilitar el análisis del estado de los tramos ofreciendo además información sobre la capacidad del pavimento deteriorado y posibilitando el diseño de su rehabilitación. Se reducen los trabajos de medición con la viga Benkelman y de campo en general, así como los ensayos de materiales en laboratorio, que suelen ser complejos y costosos.

Referencias Bibliográficas:

1. Oficina Nacional de Normalización, Carreteras—Pavimentos Flexibles—Métodos de Cálculo (NC 334/2004). Cuba. 2004.
2. Pinilla Valencia, J.A., Auscultación, calificación del estado superficial y evaluación económica de la carretera sector puente de la Libertad – Maltería desde el k0+000 hasta el k6+000, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales. Colombia. 2007.
3. Dos Santos Reis, N.F., Análise estrutural de pavimentos rodoviários. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal. 2009.
4. Centro Nacional de Vialidad, Proyecto de reciclado de la carretera Holguín-Guardalavaca. La Habana, Cuba. 2008.
5. Colectivo de Autores, Instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía. Consejería de Obras Públicas y Transportes. Dirección General de Carreteras. Sevilla, Andalucía, España. 2007.
6. Castaño Castellanos, C.A. and J. Martínez Orozco, 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. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 2002.
7. Salgado Barra, B. and L. Momm, Evaluación empírico-mecanística de las estructuras de pavimentos flexibles comparando herramientas computacionales y datos de pruebas de fatiga en laboratorio. *Infraestructura Vial* (18). 2007
8. Martínez Camacho, I., Estudio de sensibilidad de variables aplicadas al diseño de pavimentos reciclados utilizando programas computacionales. Departamento de Ingeniería Vial. Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría". La Habana, Cuba. 2013
9. Mateos Moreno, A., Modelización numérica de la respuesta estructural de los firmes flexibles a partir de medidas experimentales en pista de ensayo a escala real. *Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras*. Escuela Técnica Superior de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid (UPM), España. 2003.
10. Cinque de Proença Franco, F.A., Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil. 2007.
11. Fwa, T.F. and T.S. Rani, Seed modulus generation algorithm for backcalculation of flexible pavement moduli, *Transportation Research Record*: p. 117-127. 2005.
12. Gonzalez, A., et al., Performance of foamed bitumen pavements in accelerated testing facility. *Revista Ingeniería de Construcción*, 27 (2). 2012.

MSc. Ing. Reynier Moll Martínez, Dr. Ing. Eduardo Tejeda Piusseaut. Obtención de un modelo computacional con el software SIGMA/W, para reproducir los resultados del ensayo con la viga Benkelman.

13. Faúndez Carvajal, R.A., Estimación del coeficiente estructural del asfalto espumado mediante el análisis de deflectometría (FWD). Departamento de Ingeniería Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. 2011.
14. Pérez Salazar, A., et al., Uso y calibración de deflectómetros de impacto en la evaluación estructural de pavimentos. Quintana Roo, México. 2004.
15. Von Quintus, H.L. and A.L. Simpson, Back-Calculation of layer parameters for LTPP test sections. Layered elastic analysis for flexible and rigid pavements. Georgetown Pike, Virginia. 2002.