

**IAG122-03-2013**  
**RETROANÁLISIS PARA ESTIMAR LOS MÓDULOS DE LAS CAPAS DE**  
**UN PAVIMENTO RECICLADO CON ESPUMA DE ASFALTO.**  
**RETROANALISE PARA ESTIMATIVA DOS MÓDULOS DAS CAMADAS**  
**DE UM PAVIMENTO RECICLADO COM ESPUMA DE ASFALTO.**

Msc. Ing. Reynier Moll Martínez  
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría, CUJAE  
La Habana, Cuba  
reymoll@civil.cujae.edu.cu

Dr. Ing. Cassio Eduardo Lima de Paiva  
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)  
São Paulo, Brasil  
celpaiva@fec.unicamp.br

Msc. Ing. Valmir Bonfim  
Grupo ANE – FREMIX  
São Paulo, Brasil  
valmir@grupoane.com.br

## **Resumen**

Uno de los principales métodos para el diseño de los pavimentos rehabilitados son los empíricos-mecanicistas que utilizan la teoría del retroanálisis. Esta teoría permite estimar, con ayuda de la modelación computacional, los módulos de elasticidad "in situ" de las capas del pavimento, la subrasante y el comportamiento resistente de la estructura cuando actúa una carga externa. Resulta un procedimiento práctico debido al elevado costo que muchas veces representa realizar la evaluación deflectométrica de la vía para caracterizar los materiales que la componen. Existen numerosos programas que pueden aplicarse para el retroanálisis y que en su mayoría utilizan un modelo de respuesta estructural multicapa elástico lineal. En este trabajo se empleó KenPave. El estudio analiza los módulos obtenidos por retroanálisis para las diferentes capas de una estructura de pavimento reciclado con espuma de asfalto. Los datos utilizados corresponden al proyecto de rehabilitación de la autopista Ayrton Senna en el estado de São Paulo, Brasil; ejecutado en Octubre de 2012. La deflectometría se realizó con FWD (Falling Weight Deflectometer), en diferentes fechas (0 y 10 días; 1, 3 y 6 meses). En la fecha cero días, se midió encima de la capa remanente (después del proceso de fresado), cuando se colocó la base reciclada, y finalmente cuando se extendió la capa asfáltica. Con los valores de deflexiones obtenidos sobre cada una de las superficies se estimó por retroanálisis el Módulo de Elasticidad de estas capas. Las mediciones posteriores al día cero se han efectuado en la superficie del pavimento rehabilitado. Los resultados permiten concluir que los módulos obtenidos por retroanálisis están acordes a los parámetros que deben cumplir estas estructuras. Además, que con el tiempo hay un incremento en la resistencia de la base reciclada; encontrándose en el rango de materiales normativos y otros trabajos similares.

**Palabras clave:** retroanálisis, métodos empíricos-mecanicistas, deflexión, modelación, reciclado.

## **Resumo**

Um dos principais métodos para o desenho dos pavimentos a ser reabilitado são os empíricos-mecanicistas, usando retroanálise. O retroanálise oferece a possibilidade de estimar, com a ajuda da modelação computacional, o módulo de elasticidade "in situ" das camadas do pavimento, o subleito e o comportamento resistente da estrutura sob a ação de uma carga externa. É um processo prático devido aos elevados custos que muitas vezes representa realizar a avaliação deflectométrica da via para caracterizar os materiais que compõem. Existem diversos programas que podem ser aplicados para o retroanálise e a maioria utiliza um modelo de resposta estrutural elástico linear multi-camada. Neste trabalho foi utilizado KenPave. São analisados os módulos de elasticidade obtidos por retroanálise para as diferentes camadas de uma estrutura de pavimento reciclado com espuma de asfalto. Os dados utilizados correspondem ao projecto de reabilitação na Rodovia Ayrton Senna, no estado de São Paulo, Brasil, executado em outubro de 2012. A avaliação deflectométrica foi realizada com o FWD (Falling Weight Deflectometer), com medições em diferentes datas (0 y 10 dias; 1, 3 y 6 meses). Na data zero dia mediu-se sobre a camada restante (após o processo de fresagem), quando a base reciclada foi colocada, e finalmente, quando a camada de asfalto é espalhada. Com os valores das deflexões obtidos em cada uma das superfícies foi estimado pelo retroanálise o módulo de elasticidade destas camadas. As medições após o dia zero foram feitas na superfície do pavimento reabilitado. Os resultados mostram que os módulos obtidos por retroanálise são consistentes com os parâmetros que devam seguir essas estruturas, e que ao longo do tempo, há um aumento na resistência da base reciclada, estando na gama de materiais normativos e outros trabalhos similares.

**Palavras-chave:** retroanálise, métodos empírico-mecanicistas, deflexões, modelação, reciclagem.

## 1. INTRODUCCIÓN

El retroanálisis, también conocido como cálculo inverso o retrocálculo; permite evaluar la capacidad estructural de un pavimento, determinando el módulo resiliente de la subrasante ( $M_r$ ) y el módulo efectivo del pavimento ( $E_p$ ), a partir de las deflexiones medidas sobre su superficie. Estos resultados pueden emplearse para obtener la fisuración por fatiga, la formación de roderas debido a deformaciones plásticas, la reflexión de las fisuras de las capas tratadas con cemento o la fisuración térmica por bajas temperaturas (Medina Rodríguez, Pérez Pérez et al. 2002).

El nombre de la teoría se debe a que los datos de entrada son la deflexión del pavimento ( $d$ ), el espesor de sus capas ( $h$ ), el coeficiente de Poisson de los materiales ( $\mu$ ) y la carga aplicada a la estructura (Leal Noriega 2010). Obteniéndose como resultados el módulo de los materiales ( $E$ ), el esfuerzo en cada capa de la estructura ( $\sigma$ ), y las deformaciones unitarias ( $\epsilon$ ).

El retroanálisis es un proceso laborioso, que requiere un alto grado de habilidad, y los resultados tienen de media a alta dependencia de la persona que los hace. Esto ocurre, entre otras razones, por la falta de una norma de consenso para todos los aspectos del proceso. (Saltan, Terzi et al. 2011)

El retroanálisis ha ganado terreno debido a tres importantes avances (Irwin 2002):

1. La constatación de que los pavimentos más fuertes tienen deflexiones pequeñas; y en cambio, los pavimentos débiles tienen grandes deflexiones.
2. El desarrollo de las teorías mecanicistas que relacionan las propiedades de los materiales con las tensiones, deformaciones y desviaciones de un sistema de capas (1940-1970).
3. El desarrollo de sistemas de instrumentación portátil, precisos y económicos para la medición de las deformaciones en el pavimento (1955-1980).

En su trabajo (Mikhail, Seeds et al. 1999), expresaron que los resultados logrados por retroanálisis son sensibles a las características de la estructura del pavimento; es decir, al número

de capas y sus espesores. En una dirección similar se plantea que para la aplicación de esta teoría hay que tener muy en cuenta las propiedades de los materiales (Irwin 2002).

Cuando la teoría del retroanálisis se aplica teniendo en cuenta las mediciones de las deflexiones hay que considerar varios factores que pueden llevar a resultados erróneos: (Irwin 2002)

- Debe existir buena correlación entre los supuestos asumidos para el retroanálisis y la realidad del pavimento.
- La presencia de gran cantidad de grietas en el pavimento, o la realización de pruebas cerca del borde la vía.
- Configuración errónea del modelo por desconocer los espesores de algunas capas.
- Los espesores de las capas no son uniformes, ni sus materiales completamente homogéneos.
- Los contenidos de humedad y la profundidad de materiales de gran dureza (rocas) pueden variar a lo largo de la vía.
- Los gradientes de temperatura que existen en el pavimento.

### **1.1. La modelación computacional como herramienta en el diseño y evaluación de proyectos de reciclado de pavimentos.**

Uno de los problemas actuales para los estudios viales en algunos países es el número limitado de equipos para evaluar in situ el comportamiento de los pavimentos ante la acción del tráfico. Considerando lo anterior y por la capacidad de las herramientas computacionales actuales, resulta necesario potenciar el uso de la modelación computacional y la teoría de retroanálisis para obtener un modelo que simule el comportamiento bajo carga del pavimento.

Los modelos más conocidos y empleados actualmente son: el multicapa lineal elástico, y el Método de los Elementos Finitos (M.E.F).

La práctica generalizada en pavimentos es suponer un problema estático y materiales elástico-lineales. Así, el problema a resolver consiste en determinar los módulos de las diferentes capas del pavimento con el fin de ajustar las deflexiones medidas a varias distancias radiales. (Mateos Moreno 2003)

A nivel mundial han surgido diversos programas de computación que basados en la Teoría de la Elasticidad de Capas de Burmister dan la posibilidad de estudiar el comportamiento de las estructuras de los pavimentos a partir de calcular las tensiones y deformaciones ocurridas en ellas. No obstante, hay que ser cuidadosos en su empleo porque a pesar de ser sencillos, su proceso de interpretación lleva una serie de simplificaciones, que en algunos casos pueden conducir a caracterizar incorrectamente los materiales. Estos programas normalmente se basan en un conjunto de hipótesis que en la medida en que el estudio coincida con ellas, entonces mayor será la utilidad de los resultados obtenidos (Irwin 2002; Mateos Moreno 2003):

- Las capas son de espesor constante y extensión horizontal infinita.
- Cada capa está constituida por un material homogéneo, elástico lineal (definido por su módulo elástico y su coeficiente de Poisson), isótropo y continuo.
- La carga de cada neumático se supone uniformemente distribuida sobre un área circular.
- Existe adherencia perfecta, o bien deslizamiento perfecto entre capas.
- No se consideran los efectos dinámicos de las cargas (es un cálculo estático).

## **2. DESARROLLO Y MÉTODOS.**

### **2.1. Generalidades del proyecto.**

El caso de estudio corresponde a un tramo de 200 metros en la autopista Ayrton Senna ubicada en el estado de São Paulo, Brasil. Se evaluaron las deflexiones en 10 puntos que se encuentran entre las estaciones 36+387 y la 36+207 del carril interior en el sentido Oeste que va desde Itaquaquecetuba a São Paulo.

Estudios preliminares determinaron que la vía presentaba fallo estructural debido al colapso de la base granular tratada con cemento (BGTC) (Figuras 1 y 2). Se plantearon como posibles causas del fallo el elevado volumen de tráfico y la falta de control de carga en la vía.

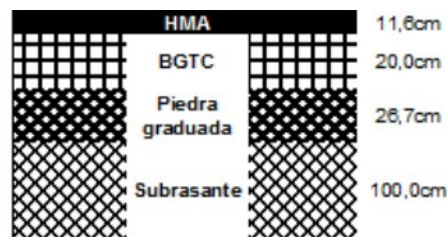


**Figura 1. Muestra del fallo presente en la vía**



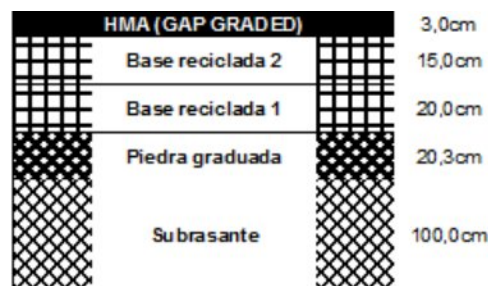
**Figura 2. Muestra del fallo de la BGTC a 30cm de profundidad posterior al fresado**

La sección transversal existente tenía la configuración que se muestra en la figura 3.



**Figura 3. Sección transversal de la vía existente.**

La solución propuesta consistió en colocar una base reciclada con espuma de asfalto fabricada en planta; compuesta por 84% de RAP, 15% de polvo de piedra, 1% de filler (cemento) y 2% de asfalto espumado. Por el gran espesor de diseño de la base granular (35cm) el proceso de colocación se realizó en dos fases para facilitar la compactación y obtener un producto final con la resistencia adecuada. Primeramente se colocó una capa de 20cm de espesor y a continuación otra de 15cm. (Figura 4)



**Figura 4. Sección transversal de la solución propuesta**

## **2.2. Estudio deflectométrico y proceso de retroanálisis para estimar los módulos.**

El estudio de las deflexiones se realizó empleando el FWD perteneciente a la empresa Dynatest. Las mediciones se planificaron para ejecutarse en varias fechas: 0; 10; 30; 90; 120; 180; 270; y a los 360 días de construida la obra. El objetivo de esta distribución es obtener la información necesaria para estudiar cómo varía en el tiempo la resistencia de la base reciclada con espuma de asfalto teniendo en cuenta que se incrementa tomando los principios mostrados en otros trabajos (Vorobieff 2005). Hasta la fecha en que se presenta este estudio se han cumplido las mediciones desde la fecha 0 días hasta el día 180.

El día de construcción de la obra (06/10/2012) se midieron las deflexiones en tres ocasiones:

- I) Encima de la capa remanente posterior al fresado de la base dañada (considerada como el cimientito de la estructura rehabilitada),
- II) posterior a la colocación de la base nueva de material reciclado, y
- III) sobre la capa asfáltica de rodadura de hormigón asfáltico caliente del tipo GAP GRADED.

En esta fecha, correspondiente al día cero, con los valores de deflexiones medidas sobre cada una de las superficies se estimaron por retroanálisis los módulos para el cimientito del nuevo pavimento, para la base reciclada y la capa asfáltica.

Para el proceso de retroanálisis se utilizó el programa KenPave (1993) que realiza un análisis del tipo multicapas lineal elástico. Para la modelación se configuró una sección con tres capas (cimientito + base reciclada + capa asfáltica).

En las fechas siguientes sólo se estimó el módulo de elasticidad de la base reciclada, manteniendo constante para el cimientito y la capa asfáltica los valores estimados el día de construcción del tramo.

Para considerar que los resultados obtenidos en el proceso de retroanálisis son adecuados se realizaron las siguientes consideraciones:

- a) Como el FWD mide las deflexiones en siete puntos, se trató que la deflexión medida con el equipo y la obtenida por retroanálisis coincidiera o fuese similar en al menos tres o cuatro puntos.
- b) Que la forma del cuenco de deflexiones por ambas vías tuviera la misma tendencia.
- c) Para estimar el módulo de elasticidad de la subrasante se consideraron los valores de deflexiones más alejados del punto de aplicación de la carga, es decir, la lectura del equipo correspondiente al geófono que se encuentra a 1,20m del punto de aplicación de la carga.

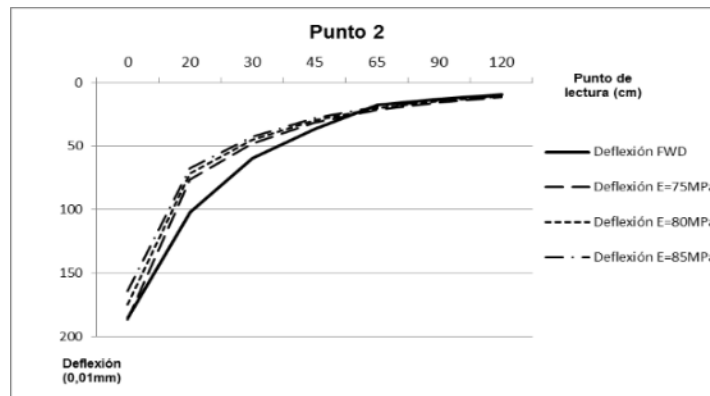
### **3. RESULTADOS OBTENIDOS DEL PROCESO DE RETROANÁLISIS.**

#### **3.1. Resultado en la fecha de construcción del tramo (cero días).**

El día de construcción del tramo se estimaron los módulos para las tres capas consideradas en el análisis, teniendo en cuenta que los resultados de módulo de elasticidad fijados para la capa granular remanente que queda posterior al proceso de fresado (cimientito del pavimento) y la superficie asfáltica se mantendrán constantes en el resto de los meses de estudio. Para todos los casos se realizó un análisis estadístico para un intervalo de confianza del 95 y 90%, escogiendo una distribución del tipo t-student teniendo en cuenta la cantidad de puntos estudiados (10).

Como ya se explicó para estimar el módulo de elasticidad del cimientito del pavimento se consideró el valor con que se obtuvo la curva de mejor ajuste entre las deflexiones medidas y las obtenidas por retroanálisis con KenPave; priorizando las lecturas en los geófonos que se

encuentran más alejados del punto de aplicación de la carga (65; 90; y 120cm). Obsérvese un ejemplo de ello en la figura 5.



**Figura 5. Gráfico de deflexiones medidas con FWD y las obtenidas con KenPave en el punto 2**

Los resultados de módulos de elasticidad estimados para el cimientto del pavimento se muestran en la tabla 1, y en la tabla 2 aparece el análisis estadístico.

**Tabla 1. Módulos de Elasticidad estimados en cada punto para la base remanente (cimientto)**

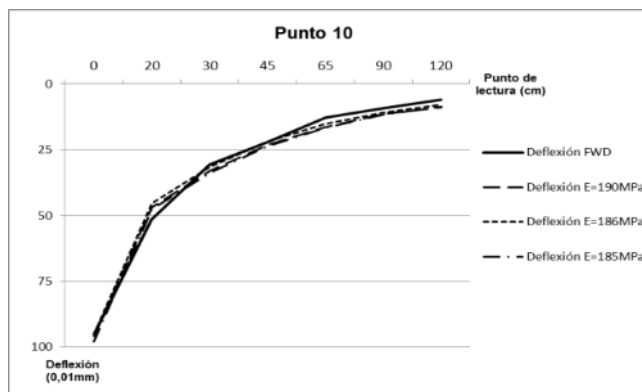
Puntos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$E_{\text{est cimientto}}$ (MPa)	100	75	53	72	55	125	150	75	80	90

**Tabla 2. Principales parámetros obtenidos del estudio estadístico para la base remanente**

Estadígrafos	Módulo de Elasticidad (MPa)
Promedio	87
Intervalo de confianza del 95%	
Límite Inferior	66
Límite Superior	109
Intervalo de confianza del 90%	
Límite Inferior	70
Límite Superior	105

De acuerdo a los valores mostrados en la tabla 1, en ocho de los puntos el módulo de elasticidad obtenido se encuentra entre 50 y 100MPa; estando más cerca del valor promedio los puntos 2, 4, 8, 9 y 10.

Para estimar los módulos de elasticidad de la base reciclada y la capa asfáltica el análisis se realizó a la inversa que para la capa del cimientto, es decir, en este caso se buscó un mejor ajuste entre las deflexiones que están más cerca del punto de aplicación de la carga (geófono =0cm). La figura 6 es un ejemplo.



**Figura 6. Gráfico de deflexiones medidas con FWD encima de la capa reciclada y las obtenidas con KenPave en el punto 10**

La tabla 3 muestra los módulos de elasticidad estimados para la base reciclada en cada punto y la tabla 4 los resultados del estudio estadístico.

**Tabla 3. Módulos de Elasticidad estimados para la base reciclada en la fecha cero días.**

Puntos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>E<sub>est</sub> Base Reciclada (MPa)</b>	50	150	150	160	123	200	150	100	134	190

**Tabla 4. Principales parámetros obtenidos del estudio estadístico para la base reciclada**

Estadísticos	Módulo de Elasticidad (MPa)
Promedio	141
Intervalo de confianza del 95%	
Límite Inferior	110
Límite Superior	172
Intervalo de confianza del 90%	
Límite Inferior	116
Límite Superior	166

De los resultados mostrados en las tablas 3 y 4 lo más destacable es que para el punto 1 el valor de módulo de elasticidad para la base reciclada es atípico respecto al resto de los puntos, incluso de magnitud menor al obtenido en este mismo punto para el cimiento.

Por último se estimaron los módulos de elasticidad para la capa de superficie y se realizó el análisis estadístico; como se muestra en las tablas 5 y 6.

**Tabla 5. Módulos de Elasticidad estimados para la superficie asfáltica de GAP GRADED**

Puntos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>E<sub>est</sub> GAP GRADED (MPa)</b>	150	1200	700	3250	325	150	500	1800	190	180

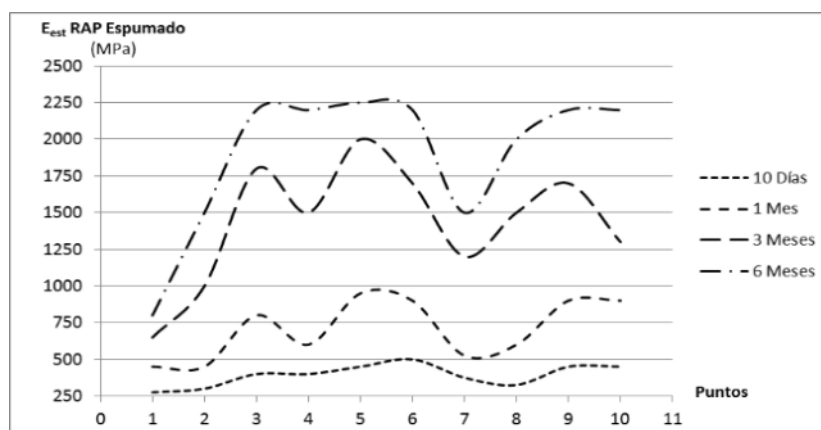
**Tabla 6. Principales parámetros obtenidos del estudio estadístico para la superficie asfáltica de GAP GRADED**

Estadígrafos	Módulo de Elasticidad (MPa)
Promedio	845
Intervalo de confianza del 95%	
Límite Inferior	126
Límite Superior	1563
Intervalo de confianza del 90%	
Límite Inferior	263
Límite Superior	1426

Según los resultados de la tabla 5 y analizando los parámetros estadísticos es fácil distinguir que no existe una uniformidad entre los valores de módulos de elasticidad obtenidos en los distintos puntos. Esto ocurre porque los resultados en los puntos 2; 4 y 8 contrastan respecto a los otros. Tal es así que la diferencia entre los límites inferiores y superiores para los dos intervalos de confianza es muy significativa.

### **3.2. Módulos de Elasticidad estimados para la base reciclada en las fechas: 10; 30, 60; 90 y 120 días de construida.**

Con el objetivo de estudiar la evolución de la resistencia de la capa reciclada con espuma de asfalto se decidió realizar mediciones con el FWD a 10; 30, 60; 90 y 120 días de construida la base reciclada para estimar el módulo de elasticidad de esta capa en esas fechas. Esto se realizó modelando una estructura de 3 capas (cimiento + base reciclada + superficie asfáltica) donde se mantuvieron fijos los valores de módulo de elasticidad estimados para el cimiento y la superficie asfáltica el día de construcción del tramo.



**Figura 7. Evolución del módulo de elasticidad de la base reciclada por fecha en cada punto**

Analizando la figura 7 puede observarse que:

- En la fecha 10 días la curva es más lineal por lo que existe mayor uniformidad entre los módulos de elasticidad estimados para cada punto respecto al resto de las fechas.
- Las curvas de tendencia para las fechas 1; 3 y 6 meses son muy similares; con ascensos y descensos entre un punto y otro de forma marcada.



- En las cuatro fechas el menor módulo siempre se obtiene en el punto 1; donde además se observan las menores variaciones de una fecha a otra.
- El mayor módulo para las fechas 30; 90 y 180 días se encuentra en el punto 5.

**Tabla 7. Principales parámetros obtenidos del estudio estadístico para la base reciclada**

Estadígrafos	10 Días	30 Días	90 Días	180 Días
	16/10/2012	05/11/2012	04/01/2013	04/04/2013
	Módulo de Elasticidad (MPa)			
Promedio	393	707	1435	1905
Intervalo de confianza del 95%				
Límite Inferior	340	563	1145	1558
Límite Superior	445	852	1725	2252
Intervalo de confianza del 90%				
Límite Inferior	350	590	1200	1624
Límite Superior	435	825	1670	2186

Según los resultados estadísticos se puede decir que:

- A seis meses de ejecutada la obra el módulo de elasticidad promedio de la base reciclada se ha incrementado en casi 5 veces respecto al día 10 de construcción.
- El promedio de los módulos entre la fecha 10 días y 30 días; y entre la fecha 30 días y 90 días se incrementa en aproximadamente un 50% en cada caso.
- Para ambos intervalos de confianza (95% y 90%) la diferencia de los límites inferiores entre la fecha 10 y 180 días es aproximadamente de 1200MPa y para el límite superior de 1800MPa.

#### **4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO.**

La estimación de los módulos de elasticidad de las capas de un pavimento por retroanálisis simplifica el trabajo de campo y puede ser utilizado como herramienta para revisar el diseño de pavimentos a rehabilitar mediante el reciclado.

Los resultados de deformación obtenidos con el FWD y con KenPave muestran un buen ajuste.

El empleo del retroanálisis considerando un comportamiento lineal elástico para la base reciclada con espuma de asfalto ha demostrado ser confiable pues los resultados de módulo están entre los parámetros recogidos en el TG-2 (Asphalt Academy 2009).

Los valores de módulo de elasticidad que se obtienen para el cimiento del pavimento y la capa asfáltica se encuentra en el rango de algunos materiales normativos (Oficina Nacional de Normalización 2004; Colectivo de Autores 2007).

La diferencia significativa entre los módulos de elasticidad estimados entre un punto y otro pudiera ocurrir por imprecisiones en el momento de realizar el ensayo o diferencia entre los materiales que componen la sección de un punto y otro. Confirmando el criterio expresado por (Mikhail, Seeds et al. 1999) de que los resultados de un estudio por retroanálisis son sensibles a las características de la estructura del pavimento.

Cuando los resultados del proceso de retroanálisis se apoyan en mediciones deflectométricas realizadas directamente sobre el pavimento con equipos de alta precisión como el FWD la probabilidad de incurrir en errores disminuye.

## **5. AGRADECIMIENTOS**

Los autores de este trabajo desearíamos agradecer a CAPES por la posibilidad de colaboración académica entre el Departamento de Ingeniería Vial de la Cujae en la Habana y el Departamento de Geotecnia y Transporte de la Universidad Estadual de Campinas en Brasil.

## **6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Asphalt Academy (2009). A guideline for the design and construction of bitumen emulsion and foamed bitumen stabilised materials. TG-2. 978-0-7988-5582-2. Pretoria, South Africa, Asphalt Academy.
- Colectivo de Autores (2007). Instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía. Andalucía. España, Consejería de Obras Públicas y Transportes. Dirección General de Carreteras. Sevilla.
- Irwin, L. H. (2002). Backcalculation: An overview and perspective. 6th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Lisboa, Portugal.
- Leal Noriega, M. H. (2010). Relación entre el módulo resiliente hallado por retrocálculo y el encontrado en ensayos de laboratorio. Tesis de Maestrado, Universidad Nacional de Colombia.
- Mateos Moreno, A. (2003). Modelización numérica de la respuesta estructural de los firmes flexibles a partir de medidas experimentales en pista de ensayo a escala real. Tesis de Doctorado Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid (UPM).
- Medina Rodríguez, L., I. Pérez Pérez, et al. (2002). "Comprobación estructural de las secciones de firme de la instrucción de carreteras 6.1 y 6.2 I.C." Revista de Obras Públicas: 35-52.
- Mikhail, M., S. Seeds, et al. (1999). "Evaluation of laboratory and backcalculated resilient moduli from the Wes Track experiment." Transportation Research Record 1687(Issue 1): 55-65.
- Oficina Nacional de Normalización (2004). Carreteras—Pavimentos Flexibles—Métodos de Cálculo. NC 334-2004. Cuba.
- Saltan, M., S. Terzi, et al. (2011). "Backcalculation of pavement layer moduli and Poisson's ratio using data mining." Expert Systems with Applications 38(3): 2600-2608.
- Vorobieff, G. (2005). Design of foamed bitumen layers for roads. AustStab Workshop on Road Stabilisation in QLD, Australia.