

## PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES CON BASES RECICLADAS

Reynier Moll Martínez<sup>1</sup>, Eduardo Tejada Piusseaut<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Ingeniero Civil, Doctor en Ciencias Técnicas, Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría" (Cujae), Calle 114 e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao. La Habana.

<sup>1</sup> e-mail: [reymoll@civil.cujae.edu.cu](mailto:reymoll@civil.cujae.edu.cu)

<sup>2</sup> e-mail: [etejada@civil.cujae.edu.cu](mailto:etejada@civil.cujae.edu.cu)

### RESUMEN

*En el 2010 Cuba comienza a aplicar el reciclado "in situ" en frío de la base de la estructura del pavimento. Por la inexistencia de normas propias para el empleo del reciclado en cualquiera de sus formas, los diseños de los proyectos ejecutados se realizaron aplicando normas internacionales que consideran condiciones de clima, características del tránsito y de los materiales que no se corresponden con las de Cuba.*

*Por lo anterior, el objetivo general de este trabajo es mostrar un procedimiento de dimensionamiento para pavimentos rehabilitados mediante el reciclado en frío e "in situ" de la base partiendo de modificaciones o adiciones a los fundamentos de diseño de la norma cubana de pavimentos flexibles (NC: 334/2004).*

*Se estudiaron los principios para el diseño y evaluación de la capacidad estructural de los pavimentos asfálticos nuevos y los rehabilitados cuando se utiliza la técnica de reciclado en frío. En el caso específico de la norma cubana de pavimentos flexibles se analizó la ley de comportamiento, las características del tráfico y los materiales. La propuesta se validó mediante la aplicación del procedimiento a un caso de estudio, pudiéndose demostrar que este considera las características del material antiguo del pavimento que permanece en la estructura nueva, además de la aplicabilidad de los principios de la NC: 334/2004 para diseñar la rehabilitación de los pavimentos flexibles.*

**Palabras claves:** pavimentos rehabilitados, reciclado en frío e in situ, tráfico, clima.

## PROCEDURE FOR THE DESIGN OF ASPHALT PAVEMENT WITH RECYCLED BASES

### ABSTRACT

*In 2010, Cuba introduced the application of cold "in situ" recycling of the base of the pavement structure. Due to the absence of own standar for the use of recycling in any of its forms, the designs of the executed projects were carried out applying international standards that considered weather conditions, traffic characteristics and materials that do not correspond to those of Cuba.*

*The general objective of this work is to show a dimensioning process for the pavements rehabilitated by the cold recycling and "in situ" of the base making modifications or additions to the design criteria of the Cuban standard of flexible pavements (NC: 334/2004).*

*They were studied the criteria for the design and evaluation of the structural capacity of the new asphalt pavements and the rehabilitated ones when the cold recycling technique is used. In the specific case of the Cuban standard of flexible pavements, the law of behavior, traffic characteristics and materials were analyzed. The proposal was validated by applying the procedure to a case study. It was demonstrated that are considered the characteristics of the old pavement material remaining in the new structure and the principles of the NC: 334/2004 are applicable solutions to design flexible pavement rehabilitation.*

**Keywords:** rehabilitated pavements, cold recycling, traffic, climate.

**Nota Editorial:** Recibido: octubre 2019; Aceptado: febrero 2020

## 1. INTRODUCCIÓN

La escasez de recursos naturales necesarios para la construcción de carreteras, así como la generación de vertederos producto de las actividades de conservación, han provocado el desarrollado de técnicas que aprovechan los materiales del pavimento en explotación para reutilizarlos en la conformación de nuevas estructuras, dentro de las cuales se encuentra el reciclado de pavimentos.

De las distintas técnicas de reciclado de pavimentos la más económica y ecológica es la producida en frío e "in situ". Consiste en la disgregación de las capas del pavimento mediante el fresado en frío, la adición de un

ligante o conglomerante (emulsiones bituminosas, asfalto espumado o cemento), permitiendo el mezclado a baja temperatura. Ocasionalmente a la mezcla se le adicionan áridos vírgenes para corregir la granulometría.

Cuba cuenta con una extensa red de caminos y carreteras de las cuales el 77% son de pavimentos asfálticos y de ellos, el 25% están evaluados en estado malo y regular por prolongados períodos de explotación. Por tal situación, una prioridad de las autoridades responsables de las carreteras en Cuba ha sido impulsar los trabajos de rehabilitación. El primer proyecto de rehabilitación aplicando el reciclado en frío "in situ" con asfalto espumado de la base se ejecutó en un tramo de 33,1 km en la carretera Holguín – Guardalavaca [1]. Posteriormente se aplicó este procedimiento en las carreteras de Moa-Holguín y en la carretera Santiago de Cuba-Granma se utilizó la tecnología, pero para estabilizar con cemento.

Los diseños estructurales de estos proyectos se concibieron empíricamente y en ocasiones, aplicando métodos de diseño internacionales que no consideraban en los parámetros de diseño las características propias de Cuba para las variables: tránsito, clima y materiales pues hasta la fecha no existen normas propias ni para la aplicación de la técnica del reciclado, ni el diseño de estructuras de pavimentos que contengan materiales reciclados. Se conocen de investigaciones que han adaptado el método de diseño de la AASHTO 2008 a condiciones específicas [2-6], siempre bajo el principio de que la eficacia del diseño depende de la calidad de la información que se tenga de las variables de entrada [7]. Estas adecuaciones, además del enfoque empírico que poseen, en ocasiones cuentan con un apoyo experimental para evitar diseños antieconómicos y fallos prematuros de la estructura [8].

En el contexto anterior se desarrolla esta investigación que tiene como objetivo, desarrollar un procedimiento de dimensionamiento para pavimentos rehabilitados mediante el reciclado en frío e "in situ" de la base partiendo de modificaciones o adiciones a los fundamentos de diseño de la norma cubana de pavimentos flexibles (NC: 334/2004).

## **2. ANÁLISIS DE LA NC:334/2004 Y PROPUESTA DE MODIFICACIONES**

### **2.1. Parámetros a estudiar de la NC: 334/2004**

La NC: 334/2004 [9], que es la norma vigente en Cuba para el dimensionamiento de pavimentos flexibles de nueva construcción, no considera entre las variantes las estructuras diseñadas mediante la técnica de reciclado. Las modificaciones o inclusiones fundamentales al procedimiento de diseño para aplicarlo en pavimentos con bases recicladas radican en:

- ✓ Determinación de la ley de comportamiento para los pavimentos en las condiciones de clima y tráfico de Cuba.
- ✓ La obtención de un modelo matemático para determinar la resistencia del nuevo cimiento formado por los materiales remanentes de la estructura original utilizando los resultados de mediciones con el equipo Penetrómetro Dinámico de Cono (DCP del inglés Dynamic Cone Penetrometer).

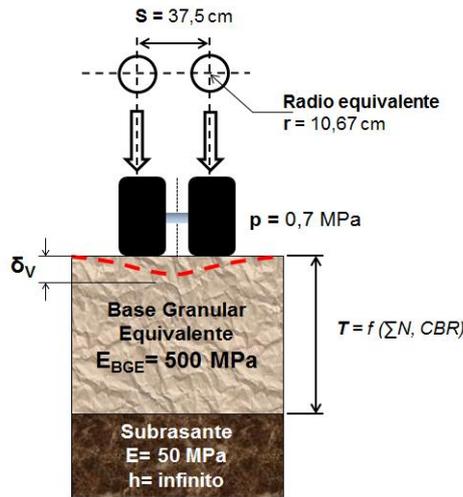
### **2.2. Ecuación de diseño y ley de comportamiento de los pavimentos flexibles para Cuba**

La ecuación de diseño de la NC: 334/2004 determina un espesor total equivalente (T) a una base granular de 500 MPa para un determinado tráfico de diseño ( $\sum N$ ) y resistencia de subrasante (ecuación 1) [9]. Este espesor total equivalente calculado se divide en espesores de superficie, base y subbase (equivalentes a 500 MPa), los que finalmente se convierten en espesores reales utilizando coeficientes de equivalencia de espesores.

$$T = (25,96 \log(\sum N) - 89,88) \cdot \left( \frac{5}{CBR} \right)^{0,4} \quad (1)$$

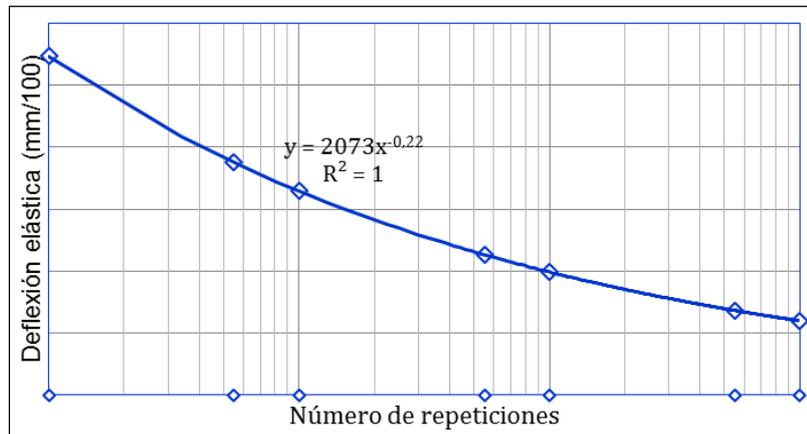
En el procedimiento que se propone la ecuación no se modifica en su concepto, ya que responde a la ley de comportamiento de los pavimentos flexibles. La transformación que se realiza es para que considere como resistencia del cimiento del pavimento la del conjunto de capas de materiales que permanecen posterior al proceso de fresado expresada en módulo de elasticidad "in situ" (E) y no en CBR.

La ley de comportamiento de los pavimentos flexibles para Cuba no está explícita en la NC: 334/2004 pero es necesario exponerla porque el procedimiento que se propone debe satisfacerla. Para determinar esta ley, se calcularon los espesores equivalentes (T) para diferentes tráficos utilizando la ecuación de diseño. La respuesta de estas estructuras se estudió considerando un modelo constitutivo lineal-elástico por lo que se utilizó el programa de cálculo analítico ALIZE – III [4] (ver figura 1). Como carga de cálculo se consideró un eje simple de 100 kN con una presión de 0,7 MPa, la separación entre centros de ruedas duales del eje simple igual a 37,5 cm y el radio equivalente de aplicación de la carga de 10,67 cm.



**Figura 1.** Modelo de cálculo en ALIZE – III para obtener la respuesta estructural teórica del pavimento.

Como resultado se obtuvieron las deflexiones elásticas en la superficie de cada estructura equivalente calculada, que al asociarlas con el tráfico de diseño correspondiente se obtiene la ley de comportamiento para los pavimentos flexibles en Cuba (figura 2).



**Figura 2.** Ley de comportamiento de los pavimentos flexibles en Cuba.

**2.3. Resistencia del cemento equivalente (E<sub>CONJ</sub>).**

Para la evaluación y diseño de soluciones de rehabilitación es necesario conocer el aporte estructural de las capas que forman el pavimento como si fuera un paquete único. Aplicando un procedimiento similar al de la “Instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de la Comunidad de Andalucía” [10] se puede determinar mediante la modelación computacional la resistencia del cemento que se forma por las capas del pavimento que se mantienen después del fresado en un proyecto de reciclado. Estas serían; la subbase y eventualmente parte de la base apoyadas sobre la subrasante original que forma el macizo semiindefinido de apoyo (figura 3).



**Figura 3.** Esquema de la estructura antigua y la nueva, formada por la base reciclada, y la capa asfáltica, apoyadas sobre el cemento equivalente.

Con la deflexión elástica originada en la superficie del modelo de cálculo producto de la carga aplicada se puede determinar, utilizando la ecuación de Boussinesq, el módulo elástico representativo del conjunto de capas o cimiento equivalente

### **2.3.1. Diseño experimental para determinar el módulo de elasticidad del cimiento equivalente (“E<sub>CONJ</sub>”).**

Se concibió un diseño experimental para reproducir mediante el programa ALIZE-III el ensayo de carga con placa y determinar la resistencia del cimiento equivalente “E<sub>CONJ</sub>” utilizando la ecuación de Boussinesq. Todos los datos de módulo de elasticidad y espesor de las capas utilizados en el estudio, corresponden a los estudios de suelo con el DCP en el proyecto de rehabilitación de la carretera Holguín–Guardalavaca [1]. Para el análisis se creó un modelo que representara las capas del pavimento que no son removidas durante el proceso de fresado/reciclado. En el mismo, las variables independientes fueron el módulo de elasticidad (E), el coeficiente de Poisson ( $\mu$ ) y el espesor de las capas (h); mientras que las dependientes fueron las tensiones ( $\sigma$ ), deformaciones y la deflexión vertical en la superficie del modelo.

Se conformaron 89 modelos, que se corresponden con la cantidad de estaciones estudiadas. En el análisis no se realizaron combinaciones de las variables independientes, sino que se modeló cada estación con las lecturas de módulo de elasticidad que se obtuvieron en cada espesor y el coeficiente de Poisson fue el mismo en todos los casos.

#### **a) El modelo geométrico.**

El modelo geométrico de la estructura está formado por las capas del pavimento que no serán removidas durante el fresado/reciclado, las que conformarán el cimiento sobre el cual se apoya la base reciclada.

#### **b) Propiedades de los materiales.**

Para caracterizar cada capa se utilizó el parámetro módulo de elasticidad (E) utilizando los resultados de las mediciones con el DCP a partir de ecuaciones de correlación con el CBR [11-16]. Se realizaron tres (3) lecturas con el DCP, cada una de ellas cada 20 cm de profundidad en sentido descendente comenzando 20 cm por debajo del nivel de la capa asfáltica, por lo que esta no interviene en el análisis. Este proceder permitió obtener la resistencia de las capas granulares en espesores de 20 cm y la última lectura realizada hacia la profundidad de los estratos se consideró que era una capa de espesor infinito ( $h_3$ ).

De esta manera se pueden identificar los módulos de elasticidad en sentido descendente hacia la profundidad del estrato de tres capas identificadas como E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> y E<sub>3</sub> a las que les corresponde respectivamente un espesor  $h_1$ ;  $h_2$  y  $h_3$ .

El otro parámetro de caracterización de las capas de suelo fue el coeficiente de Poisson, empleándose un valor de 0,35 por ser de material granular.

#### **c) Modelo constitutivo.**

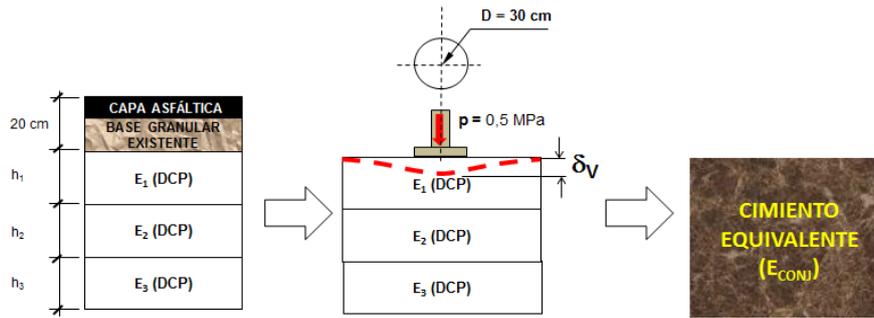
El modelo constitutivo empleado fue lineal elástico; por lo que el contacto entre las capas se modeló en condiciones de adherencia total (bonded). Este supuesto es común en la ingeniería de pavimentos cuando se emplean enfoques empíricos - mecanicistas para analizar la respuesta de una estructura ante las cargas actuantes [6, 17-19].

#### **a) Las cargas.**

En la modelación del ensayo de placa, la magnitud de la carga (p) fue de 0,5 MPa, aplicada en un diámetro (D) igual a 30 cm que se corresponde con la dimensión de la placa del ensayo real [10].

#### **b) Los resultados.**

Como resultados de la modelación se obtuvieron las tensiones, deformaciones y la deflexión teórica vertical a nivel de superficie ( $\delta_v$ ).



**Figura 4.** Esquema general del modelo computacional con los datos de geometría, propiedades de los materiales a considerar y variable de salida.

Tomando como base la ecuación de Boussinesq, se sustituye el valor de deflexión vertical en la superficie ( $\delta_v$ ) para calcular el módulo de elasticidad o resistencia del conjunto de capas granulares ( $E_{CONJ}$ ) que constituirán el cimiento equivalente de la estructura (ecuación 2) [20].

$$E_{CONJ} = \frac{p \cdot D}{\delta_v} (1 - \mu^2) \quad (2)$$

Donde “p” (MPa) es la presión aplicada, “D” (cm) el diámetro de la placa, “ $\delta_v$ ” (mm/100) es la deflexión vertical en la superficie y “ $\mu$ ” el coeficiente de Poisson de los materiales.

### 2.3.2. Obtención del modelo de regresión [21]

Para describir la relación entre el módulo elástico equivalente del conjunto ( $E_{CONJ}$ ) y los módulos elásticos de las capas que componen el cimiento se probaron diferentes modelos, seleccionándose por sus resultados el modelo potencial de la forma en que se muestra en la ecuación 3. Donde las variables independientes  $E_1$ ,  $E_2$  y  $E_3$ , son los módulos elásticos de las capas que conforman el cimiento (figura 4).

$$E_{CONJ} = E_1^{b1} \cdot E_2^{b2} \cdot E_3^{b3} \quad (3)$$

Utilizando el programa estadístico StatGraphic se obtuvieron por regresión lineal los parámetros del modelo matemático que representa el módulo de conjunto (ecuación 4). Se analizó la posibilidad de simplificar el modelo; pero como el “Valor-P” es menor que 0,05 para todas las variables independientes, se concluyó que todos los términos fueron estadísticamente significativos para un nivel de confianza del 95%; por lo que no fue posible eliminar ninguna variable del modelo. La ecuación definitiva del modelo ajustado quedó como:

$$E_{CONJ} = E_1^{0,5163} \cdot E_2^{0,2163} \cdot E_3^{0,2631} \quad (4)$$

Se comprobó la correspondencia entre los valores de módulo de elasticidad del conjunto o cimientos equivalentes experimentales (ALIZE-III) y los teóricos (modelo matemático de regresión) para las 89 estaciones. Se comprobó una similitud entre los resultados por ambos métodos ya que la pendiente de la recta es muy próxima a la unidad con un  $R^2$  igual a 0,9965. Los resultados del análisis indicaron que el modelo de regresión puede ser empleado para estimar la calidad del cimiento donde se apoyará la base reciclada y la superficie asfáltica; con los datos obtenidos durante los estudios previos en el pavimento con un mínimo de intervención.

### 2.4. Valor característico de módulo de elasticidad para un tramo evaluado.

De acuerdo a la NC: 334/2004 [9], el CBR característico de un tramo de subrasante se obtiene evaluando “in situ” una muestra de puntos y confeccionando un gráfico de frecuencias acumuladas. Se selecciona una probabilidad de diseño en función del tráfico que utilizará la vía o del número de ejes acumulados y se determina el valor de resistencia que satisface dicha probabilidad. El valor característico de cada tramo puede también obtenerse mediante la estadística descriptiva con los módulos de elasticidad obtenidos en cada punto del tramo homogéneo evaluado; calculándose el valor medio ( $E_M$ ), la desviación estándar ( $s$ ) y el valor de  $k$  es dependiente de la probabilidad de diseño.

$$E_C = E_M - (k * s) \quad (5)$$

**2.5. Tráfico de diseño.**

El tráfico se determina como el número total de cargas por ejes esperados en el carril de diseño durante el período de diseño, expresado como el número de ejes equivalentes a 100 kN ( $\Sigma N$ ). Para determinar el tráfico inicial en los proyectos de rehabilitación de pavimentos se debe considerar la sumatoria de los volúmenes que representan el tráfico existente, el atraído o desviado y el generado. Diferentes normativas e investigaciones señalan que los efectos combinados de estos tres volúmenes dan como resultado tasas de crecimiento anual que oscilan entre el 2 y el 5% [6, 9, 10, 17, 22].

En Cuba prácticamente se carece de información sobre la tendencia de histórica en la variación del tránsito, por ello la razón de crecimiento del tráfico se puede estimar en base al crecimiento del Producto Interno Bruto (PIB) o a través de las tendencias de crecimiento de la carga transportada con la información que ofrece el Anuario Estadístico de Cuba, publicado por la Oficina Nacional de Estadísticas e Información.

Para evaluar la tendencia de crecimiento de la carga se analizó el período desde el 2006 al 2015 donde no se apreció una tendencia mantenida en todo el período estudiado, con grandes variaciones y un significativo descenso entre el 2009 y 2011, y una recuperación hasta el 2013. En este caso no resulta conveniente adoptar como razón de crecimiento la correspondiente a los últimos cinco años del período estudiado donde el porcentaje de incremento es del 6,5%, porque no es una tendencia uniforme. Parece entonces más adecuado seguir considerando los valores de crecimiento entre 3 y 4% que recomienda la NC: 334/2004 [9], aunque pudiera ampliarse el espectro entre 2 y 5%.

**2.6. Ecuación de diseño. Espesor total equivalente.**

El espesor total (T), expresado en base granular equivalente de 500 MPa se obtiene mediante la ecuación 1 o utilizando un nomograma que relaciona el espesor con el tráfico de diseño. En la ecuación, el término

$\left(\frac{5}{CBR}\right)^{0,4}$  permite considerar resistencias de subrasante diferentes a 5% de CBR, que es la menor calidad de subrasante aceptada por la norma, a través de su relación con la resistencia de proyecto para la subrasante (CBR). Para una estructura a rehabilitar las propiedades resistentes de los materiales "in situ" pueden obtenerse mediante el DCP. El modelo que relaciona el módulo y el CBR "in situ" obtenidos con el equipo responde a la forma:

$$E(MPa) = a \cdot CBR^b \tag{6}$$

Donde "a" y "b" son factores que dependen de la calibración del equipo y el CBR expresado en %. Si en la ecuación para el cálculo del espesor total equivalente se considera el módulo de elasticidad medido "in situ", entonces quedaría de la forma siguiente:

$$T = [25,96 \log(\Sigma N) - 89,88] \cdot \left[ \frac{E_{SR\ mín}}{E_{CONJ}} \right]^{0,4} \tag{7}$$

Donde  $\Sigma N$  es el número de ejes equivalentes a 100 kN en el carril de diseño durante el período de diseño, ESR mín (en MPa) es el módulo de elasticidad mínimo "in situ" obtenido con DCP, y E<sub>CONJ</sub> (en MPa) es el módulo para el nuevo cimiento de la estructura.

Para fijar el valor del módulo mínimo (E<sub>SR mín</sub>) se correlacionaron 75 observaciones de módulos con las medidas de CBR "in situ" obtenidas con el DCP, que proceden del proyecto de reciclado de la carretera

Holguín - Guardalavaca. El modelo responde a la ecuación de regresión:  $E = 7,2237 \cdot CBR^{0,8399}$ .

Sustituyendo en la ecuación 7, el módulo de elasticidad que le corresponde al valor mínimo de CBR (5%), la ecuación del espesor total equivalente, expresando la resistencia del cimiento en MPa, se puede formular como:

$$T = [25,96 \log(\Sigma N) - 89,88] \cdot \left[ \frac{28}{E_{CONJ}} \right]^{0,4} \tag{8}$$

Donde " $\Sigma N$ " es el número de ejes equivalentes a 100 kN en el carril de diseño durante el período de diseño y "E<sub>CONJ</sub>" el módulo del cimiento equivalente, formado por la subrasante y subbase originales (MPa).

## 2.7. Espesores mínimos equivalentes de superficie ( $T_s$ ).

La NC: 334/2004 [9] determina el espesor mínimo de superficie de hormigón asfáltico ( $T_s$ ) expresado como equivalente a una base de 500 MPa, de acuerdo al tráfico de diseño y a la relación entre el módulo de la capa asfáltica y el de la subyacente ( $E_1/E_2$ ), considerada como base equivalente. En las estructuras rehabilitadas mediante el reciclado de la base con ligantes asfálticos, la relación ( $E_1/E_2$ ) es inferior al valor mínimo contemplado en la norma de diseño (1,5); ya que los módulos de elasticidad que alcanzan estas bases recicladas ( $E_{BR}$ ) son superiores a los 500 MPa utilizados como referencia. De este modo, para los proyectos de reciclado, los espesores mínimos equivalentes de superficie serán los que corresponden para la relación  $E_1/E_2 = 1,5$ , según el tráfico de diseño.

## 2.8. Espesores mínimos equivalentes de base reciclada ( $T_{BR}$ ).

El espesor equivalente necesario de una base reciclada ( $T_{BR}$ ), conocidos los espesores equivalentes, total y de superficie asfáltica, se determina como la diferencia entre ambos (9).

$$T_{BR} = T - T_s \quad (9)$$

Siendo "T" el espesor total equivalente en función del tráfico de diseño y la resistencia del cemento y "T<sub>s</sub>" el espesor mínimo de superficie asfáltica para la relación  $E_1/E_2 = 1,5$ .

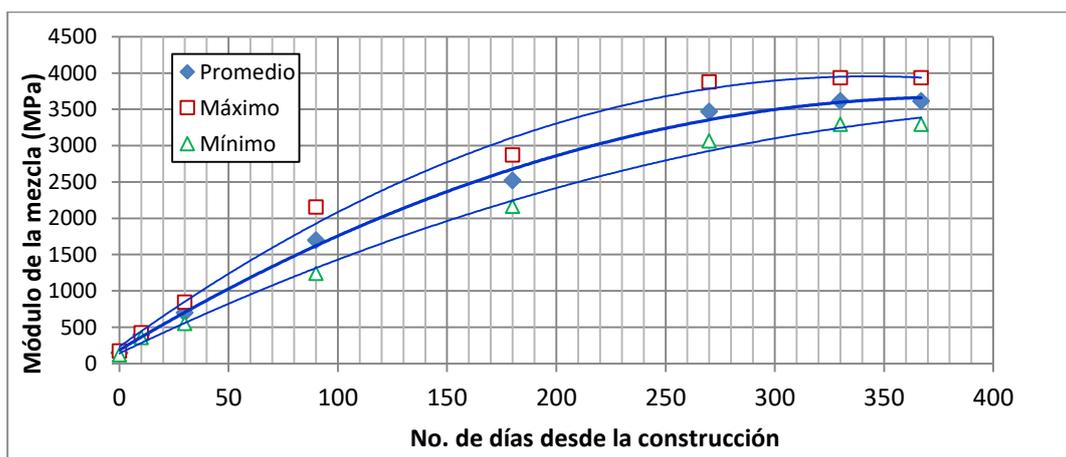
## 2.9. Resistencia de la base reciclada.

El módulo de elasticidad de un material tratado con asfalto se puede determinar a través de ensayos de laboratorio a diferentes muestras con distintos porcentajes de asfalto añadido o aplicando el retrocálculo.

Se ejecutó un estudio experimental a un tramo de 200 metros en la autopista Ayrton Senna, ubicada en el estado de São Paulo, Brasil. Las mediciones se ejecutaron con el deflectómetro de impacto del tipo FWD, en diferentes periodos de tiempo desde la ejecución de la obra. El objetivo fue analizar cómo varía en el tiempo la resistencia de la base reciclada [23]. Para el estudio se aplicó el retrocálculo utilizando el programa KenPave (1993) configurando un modelo con tres capas (cemento, base reciclada y capa asfáltica).

El día de construcción de la obra se midieron las deflexiones encima de la capa remanente posterior al fresado de la base dañada (considerada como el cemento de la estructura rehabilitada), posterior a la colocación de la base reciclada con asfalto espumado y sobre la capa de rodadura de hormigón asfáltico caliente del tipo abierta.

En la fecha correspondiente al día cero se estimaron por retrocálculo los módulos para el cemento del nuevo pavimento y para la base reciclada. En las fechas siguientes sólo se estimó el módulo de elasticidad de la base reciclada (figura 5).



**Figura 5.** Evolución en el tiempo de la resistencia promedio de la base reciclada con asfalto espumado en las diez estaciones estudiadas.

A partir de los 270 días no existe una variación en los módulos por lo que se considera que es la fecha en que esta capa ha alcanzado la fase de maduración y el módulo de elasticidad promedio es de 3455 MPa. Sin embargo, no es conveniente esperar tanto tiempo para disponer de un valor para la resistencia que debe ser considerada en la base reciclada, por eso se ha considerado fijar para el diseño 90 días desde la construcción de la capa, por consiguiente, un valor medio de resistencia de 1500 MPa.

Considerando los resultados de este estudio, de lo establecido por el Manual de Reciclado en Frío de la Wirtgen [24] y de acuerdo a la experiencia cubana empleando el reciclado en frío “in situ” con asfalto espumado, donde la mezcla de base tratada resultante posee entre 20 y 60% de RAP, puede asumirse que la resistencia final estará entre 1000 y 2000 MPa.

**2.10. Coeficientes de equivalencia de espesores ( $a_i$ ).**

El coeficiente de equivalencia “ $a_i$ ” establece la equivalencia entre un espesor de capa real y el necesario considerando una base de 500 MPa (para superficie o base reciclada). Los coeficientes de equivalencia de la superficie asfáltica en la norma de diseño de pavimentos flexibles se determinaron aplicando el criterio de Odemark (ecuación 10) [9].

$$a_i = \sqrt[3]{\frac{E_i}{E_{ref}}} \tag{10}$$

Siendo  $E_i$  el módulo de deformación estático de la mezcla asfáltica y  $E_{ref}$  el módulo de deformación estático de la capa de referencia (base granular de 500 MPa).

La NC: 334/2004 [9] fija los valores de coeficientes de equivalencia igual a 1,25 para mezclas densas y semidensas con tamaño máximo del árido superior a los 19 mm; e igual a 1,12 para mezclas del mismo tipo pero con tamaño máximo del árido inferior a los 19 mm.

Para determinar los coeficientes de equivalencia de espesor cuando la base es obtenida mediante la técnica de reciclado del pavimento, se parte de considerar la equivalencia entre una capa de base de 500 MPa y las resistencias posibles para las bases recicladas con emulsión bituminosa o asfalto espumado. El procedimiento de diseño de la norma cubana no incluye los coeficientes de equivalencia para estos casos por lo que se asumieron los que aparecen en el Manual de Reciclado en Frío de Wirtgen [24] determinados para cuando los materiales tratados con asfalto espumado o emulsión bituminosa han alcanzado su módulo elástico de servicio.

**2.11. Espesores reales de superficie y base reciclada.**

Cada espesor equivalente “ $T_i$ ” de superficie y base reciclada se debe transformar en uno real “ $h_i$ ” empleando los coeficientes de equivalencia de espesor “ $a_i$ ” de superficie y de base reciclada.

$$h_i = \frac{T_i}{a_i} \tag{11}$$

Cuando se determine el espesor real de base reciclada debe tenerse en cuenta que el reciclado con ligantes asfálticos se puede aplicar en espesores entre 12 y 20 cm. Si este espesor es inferior a 12 cm no es realizable desde el punto de vista constructivo y su incremento puede no resultar económico; mientras que espesores superiores a 20 cm dificultan la homogeneidad y compactación de la mezcla.

**3. APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO A UN CASO DE ESTUDIO.**

El primer proyecto cubano de reciclado en frío de la base donde se empleó como ligante el asfalto espumado, consistió en la rehabilitación de un tramo de 31,1 km en la carretera Holguín – Guardalavaca, desde el km 22,10 hasta el 53,20.

**3.1. Evaluación del tramo previo a la rehabilitación.**

El pavimento es flexible, constituido por una base granular de serpentinas, obtenido de canteras locales y capas asfálticas con espesor entre 8 y 12 cm; aunque superiores en algunos puntos, por reparaciones puntuales realizadas. Se proyectó un reciclado en frío de la estructura existente mediante el tratamiento con asfalto espumado, según espesores estimados en el diseño y en un ancho de 7,80 m; colocándose en la superficie una capa de rodadura de hormigón asfáltico caliente con espesor de 4 cm, en un ancho total de 7,50 m. Para ejecutar la rehabilitación, el tramo de vía fue dividido en 5 secciones.

**3.2. Tráfico de diseño.**

El tráfico de diseño se determinó a partir de conteos realizados en el período de un año en la vía y fue estimado en 2,5 millones de ejes equivalentes a 100 kN, para un período de diseño de 20 años con una razón de crecimiento del 3%.

### 3.3. Evaluación estructural con la viga Benkelman.

Las medidas de deflexiones con la viga Benkelman fueron ejecutadas a intervalos de 25 y 40 m, en las líneas de tráfico izquierda y derecha. Los resultados indicaron una gran variabilidad en la rigidez del pavimento a lo largo de toda la vía. Las deflexiones menores de 0,2 mm no se incluyeron en el análisis porque indican un pavimento muy rígido, incompatibles con un material granular natural.

### 3.4. Evaluación de la resistencia de los estratos utilizando el DCP.

La investigación de la resistencia de las capas granulares del pavimento y de la subrasante se realizó empleando el DCP. Las mediciones comenzaron 200 mm por debajo de la superficie de la carretera y el análisis de los resultados se efectuó con el software "DCP Analyser".

### 3.5. Diseño de la estructura de pavimento reciclado en la carretera Holguín – Guardalavaca aplicando el procedimiento propuesto.

Para evaluar el procedimiento de diseño propuesto se utiliza la información de las secciones 2 y 4 del proyecto de la carretera Holguín – Guardalavaca, donde el tráfico de diseño se estimó en 2,5 millones de ejes equivalentes a 100 kN.

#### 3.5.1. Selección de los tramos homogéneos y determinación del módulo de elasticidad característico del cimiento equivalente en cada uno.

Con los resultados de la evaluación deflectométrica se aplicó el método de suma acumulada de las deflexiones para establecer los tramos homogéneos. Se determinaron nueve subtramos para la sección 2 y siete para la sección 4. Posteriormente se calculó el módulo de elasticidad del conjunto en cada estación por subtramo homogéneo empleando la ecuación del modelo de regresión y con los resultados se determinó el módulo de elasticidad característico del conjunto de capas o cimiento equivalente ( $E_{CONJ\text{ caract}}$ ), para cada subtramo para una probabilidad del 87,5% correspondiente a un tráfico pesado.

#### 3.5.2. Cálculo de los espesores equivalentes: total del pavimento, de superficie y de base reciclada, para cada subtramo.

El espesor total equivalente se determinó con el tráfico de diseño y el valor característico del módulo de conjunto de cada tramo homogéneo mediante la ecuación 8 del epígrafe 2.6.

El espesor mínimo de superficie se determinó utilizando el nomograma de la figura 2 de la NC: 334/2004, con el tráfico de diseño y la relación  $E_1/E_2= 1,5$ . Se obtuvo como resultado, un espesor mínimo de superficie equivalente de 7,5 cm.

También se obtuvo en cada tramo homogéneo el espesor equivalente de base reciclada necesario; siendo la diferencia entre los espesores equivalente total y el de superficie. Los espesores equivalentes de superficie y base reciclada, fueron convertidos a espesores reales utilizando la ecuación 11 del epígrafe 2.11.

Para la superficie asfáltica el coeficiente de equivalencia es igual a 1,25, mientras que para la base reciclada se estimó igual a 1,60 que es el correspondiente a una base reciclada con resistencia de 2000 MPa.

Con los espesores de diseño obtenidos (columnas "c – f" de la tabla 1) se modelaron las estructuras en ALIZE-III para estimar la deflexión en la superficie y compararla con la admisible para el tráfico proyectado de acuerdo a la ley de comportamiento para Cuba. Para un tráfico de 2,5 millones de ejes de 100 kN la deflexión admisible es de 0,81 mm.

### 3.6. Análisis de los resultados del caso de estudio.

1. Teniendo en cuenta la deformación vertical que se obtiene mediante ALIZE-III en la superficie de la estructura con base reciclada y chequeándola con la ley de comportamiento propuesta, se puede afirmar que cumple este criterio para todos los casos por lo que se considera que la solución de diseño obtenida por el procedimiento propuesto es adecuada.
2. Se obtuvo una diferencia entre el espesor de superficie asfáltica del proyecto original y el del procedimiento propuesto de 2 cm, siendo inferior en el proyecto construido.
3. Los espesores de base reciclada obtenidas por el procedimiento propuesto son diferentes para todos los tramos comparados, siendo superiores respecto al proyecto original, en el 75% de los tramos homogéneos (12/16).

Tabla 1. Resultados del diseño de la estructura de pavimento por cada subtramo por sección.

a	b	C	d	e	f	g	h	i
Tramos homogéneos	$E_{CONJ\ CARACT}$ (MPa)	T (cm)	$T_S$ (cm)	$T_B$ (cm)	$h_s$ (cm)	$h_{BR}$ procedimiento (cm)	$\delta_V$ superficie (mm/100)	$h_{BR}$ proyecto (cm)
2-1	131,20	41,09	7,5	33,59	6,0	21	38,6	20
2-2	149,28	39,02		31,52		20	36,7	15
2-3	145,22	39,45		31,95		20	37,4	17,5
2-4	99,87	45,82		38,32		24	41,8	27
2-5	141,74	39,84		32,34		20	37,9	17,5
2-6	165,96	37,40		29,90		19	35,5	15
2-7	215,57	33,69		26,19		16	33,1	15
2-8	203,69	34,46		26,96		17	33,3	15
2-9	125,52	41,82		34,32		21	39,6	27,5
4-1	115,37	43,26		35,76		22	40,5	30
4-2	282,77	30,22		22,72		14	29,9	15
4-3	158,03	38,14		30,64		19	36,5	15
4-4	202,60	34,53		27,03		17	33,4	15
4-5	126,07	41,75		34,25		21	39,5	17,5
4-6	136,54	40,44	32,94	21	37,7	17,5		
4-7	179,32	36,26	28,76	18	34,9	17,5		

#### 4. CONCLUSIONES

En el diseño de pavimentos con base reciclada, la calidad de la subrasante, así como los espesores y calidad de los materiales no removidos de base y subbase, forman un nuevo cimiento que aporta resistencia para el dimensionamiento. La utilización de un modelo de regresión permite al proyectista estimar la resistencia de ese nuevo cimiento, de forma económica.

Para definir un valor específico de la razón de crecimiento del tráfico es necesario analizar la evolución de los volúmenes en la red donde esté ubicado el proyecto, al menos en los cinco años previos al momento de diseño de la rehabilitación para utilizarlo como tendencia futura. En Cuba, puede emplearse una razón de crecimiento entre 2 y 5%, dependiendo de la importancia del proyecto y de las perspectivas de desarrollo de la región.

La ecuación utilizada para calcular el espesor total equivalente puede emplearse para cualquier estructura flexible con base reciclada, no obstante, para considerar las mediciones obtenidas "in situ" en las pruebas con el DCP, debe modificarse la resistencia de referencia en el cimiento.

El módulo de elasticidad mínimo de la base reciclada con asfalto espumado o emulsión bituminosa debe ser de 500 MPa, ya que no se justifica económicamente un valor inferior.

Las resistencias de las bases recicladas con ligantes asfálticos son superiores a la de mejor calidad considera la NC: 334/2004 [9], por lo que los coeficientes de equivalencia de espesores de base propuestos son los del Manual de Reciclado en Frío de la Wirtgen [24].

El empleo del retrocálculo considerando un comportamiento lineal elástico para la base reciclada con espuma de asfalto ha demostrado ser confiable pues los resultados de módulo obtenidos se encuentran en los intervalos reconocidos por la bibliografía consultada.

El procedimiento propuesto está concebido con los criterios de la NC: 334/2004 [9]; por lo que considera las condiciones más desfavorables de trabajo de los pavimentos en Cuba, responde a las exigencias climáticas y de comportamiento de estas estructuras para el período de diseño establecido. A su vez, demuestra la aplicabilidad que tienen los principios y criterios que aparecen en la norma cubana de diseño de pavimentos flexibles para obtener un procedimiento para pavimentos reciclados.

#### 5. REFERENCIAS

- [1] Centro Nacional de Vialidad, "Proyecto de reciclado de la carretera Holguín-Guardalavaca", Ministerio de Transporte, La Habana, Cuba, 2008.
- [2] M. J. M.-E. Romero, N. M. Tafur Garro, and G. Gallardo Zevallos, "Implementation of the mechanistic-empirical pavement design in northern Peru using a calibration coefficient for the International Roughness Index", *Construction and Building Materials*, vol. 102, pp. 270-280, 2016.

- [3] S. R. Harnaeni, F. P. Pramesti, A. Budiarto, and A. Setyawan, "A preliminary study of mechanistic approach in pavement design to accommodate climate change effects", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 129, p. 012037, 2018.
- [4] M. Martínez Díaz and I. Pérez, "Mechanistic-empirical pavement design guide: features and distinctive elements", *Revista de la construcción*, vol. 14, pp. 32-40, 2015.
- [5] N. Donelli, J. L. Fernandes, C. A. P. Silva, and H. Barbosa, "Avaliação de desempenho pelo MEPDG: o efeito da variação de espessuras de pavimentos flexíveis", *Journal of Transport Literature*, vol. 9 (1), pp. 20-24, 2015.
- [6] *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide. A manual of practice*, 2008.
- [7] P. Dalla Valle and N. Thom, "Variability in Pavement Design", *International Journal on Pavement Engineering & Asphalt Technology*, vol. 16, 06/16 2015.
- [8] M. S. Ranadive and A. Tapase, "Parameter sensitive analysis of flexible pavement", *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 9, 11/30 2016.
- [9] *Carreteras—Pavimentos Flexibles—Métodos de Cálculo*, NC: 334/2004, 2004.
- [10] *Instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía*, 2007.
- [11] H. A. Alghamdi, "Dynamic Cone Penetrometer (DCP). Based evaluation of sustainable low volume road rehabilitation techniques," Master of Science, Faculty of the Russ College of Engineering and Technology, Ohio University, United State of America, 2016.
- [12] S. Shankar and Y. Ravi, "In-situ strength evaluation of pavement layers of low volume road using Dynamic Cone Penetrometer (DCP)", *Transactions on Engineering and Sciences*, vol. 2, 2014.
- [13] J. Rolt and M. Ian Pinard, "Designing low-volume roads using the dynamic cone penetrometer", *Transport*, vol. 169, 2016.
- [14] J. J. Muhammed and M. M. Abdella, "Evaluation of subgrade capacity of jimma soils using DCP test: A correlation of CBR and DCPI", *Malaysian Journal of Civil Engineering*, vol. 30 (3), 2018.
- [15] P. Paige-Green and G. Daniel Van Zyl, "A review of the dcp-dn pavement design method for low volume sealed roads: development and applications", *Journal of Transportation Technologies*, vol. 9, pp. 397-422, 2019.
- [16] F. Jove Wilches, J. J. Feria Díaz, and J. R. Hernandez Ávila, "Correlation between California Bearing Ratio (CBR) and Dynamic Cone Penetrometer (DCP) for soil from Sincelejo city in Colombia ", *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 13 (4), pp. 2068-2071, 2018.
- [17] S. A. Romanoschi and A. Q. Abdullah, "Development of a simplified flexible pavement design protocol for New York State Department of Transportation based on the AASHTO mechanistic-empirical pavement design guide", University of Texas at Arlington, 2017.
- [18] A. G. dos Santos, R. K. Mathias de Assis, and J. L. Fernandes Júnior, "Efeito da aderência entre camadas na previsão de desempenho de pavimentos asfálticos ", *Transportes*, vol. 27, No 2, 2019.
- [19] L. Bertulienė, "Research of methods for determining the strength of subgrade of road pavement," presented at the 9th International Conference "Environmental Engineering", Vilnius, Lithuania, 2014.
- [20] M. Mikolainis, M. Ustinovičius, D. Sližytė, and T. Zhilkina, "Analysis of static and dynamic deformation modulus", *Engineering Structures and Technologies*, vol. 8 (2), pp. 79-84, 2016.
- [21] A. A. Jawad, R. R. Almuhanha, and A. M. Shaban, "Three-dimensional finite element analysis for determining subgrade reaction modulus of subgrade soils", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 745, p. 012137, 2020.
- [22] E. Zaldivar, "Metodología de diseño de refuerzos para la rehabilitación de pavimentos flexibles en Cuba," Tesis de Doctorado, Departamento de Ingeniería Vial, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría" (Cujae), La Habana, Cuba, 2008.
- [23] R. Moll, C. E. Lima de Paiva, and V. Bonfim, "Retroanálisis para estimar los módulos de las capas de un pavimento reciclado con espuma de asfalto," presented at the XVII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Guatemala, 2013.
- [24] *Manual de Reciclado en Frío*, I. 3-936215-05-7, 2004.