

CONTRIBUCIÓN AL DESARROLLO DE MATERIALES Y MÉTODOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE PAVIMENTOS Y EXPLANACIONES VIALES EN CUBA

Dr. CT Eduardo Tejeda Piusseaut¹, Dra. CT Anadelys Alonso Aenlle¹, Dr. CT Félix Michael Hernández López¹, Dr. CT Reynier Moll Martínez¹, Dra. CT Milena Mesa Lavista¹, MSc. Juan Mario Junco del Pino², Dr. CT Carlos Andrade Neto³, Dr. CT Carlos Recarey Morfa⁴, Dr. Francisco Lamas Fernández⁵

1. Departamento de Viales, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría", CUJAE, La Habana, Cuba.
2. Ministerio de la Construcción de Cuba, MICONS.
3. Universidad Aghostino Neto, Luanda, República de Angola.
4. Departamento de Construcciones, Facultad de Construcciones, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas UCLV.
5. Universidad de Granada, España.

RESUMEN

Se describen los resultados alcanzados en el desarrollo de investigaciones que constituyen importantes aportes para la vialidad del país, considerando las condiciones propias de materiales, de tráfico y ambientales, como son los métodos creados para el diseño de pavimentos flexibles y rígidos de nueva construcción, así como los métodos de diseño de pavimentos flexibles rehabilitados, empleando reciclado en frío o el refuerzo de pavimentos basado en medidas de deflexiones. También se describen los resultados de la estabilización de suelos de subrasantes de carreteras empleando un aditivo obtenido en Cuba, el uso de la zeolita natural cubana y el jugo del Henequén como modo de reducir la temperatura de fabricación de las mezclas asfálticas, el empleo polvo de neumático fuera de uso para reducir la acumulación de desechos de este tipo y contribuir con la reducción del impacto ambiental y las recomendaciones de diseño de terraplenes altos, utilizando por primera vez en el país la modelación computacional. La integración de estos resultados, permiten dar soluciones a problemas viales, con un avance significativo en la comprensión del comportamiento de terraplenes y estructuras de pavimentos, así como la utilización de herramientas de diseño que serán introducidas en la práctica, lo que puede colocar a Cuba en una posición de avanzada en Latinoamérica.

Palabras claves: pavimento flexible, pavimento rígido, modelación computacional, terraplenes altos, mezclas semicalientes, reciclado de pavimentos, estabilización de suelos

1. INTRODUCCIÓN

Los pavimentos flexibles de carreteras están constituidos por capas de diferentes materiales, conocidas como superficie, base y subbase, donde la superficie es una mezcla de asfalto y áridos, mientras que la base y subbase están formadas por suelos, materiales pétreos o una mezcla de éstos con algún aglomerante o conglomerante. Los pavimentos rígidos lo conforman una losa de hormigón hidráulico apoyada sobre un material de base.

El diseño, construcción y conservación de los pavimentos tiene una alta complejidad, derivado precisamente de los diferentes comportamientos de cada material, los que se encuentran afectados por las variaciones estacionales de temperatura y humedad, además de la acción directa del tráfico.

Significativo papel desempeña en el comportamiento de los pavimentos la calidad del cimiento en el cual se apoya la estructura, formada por suelos naturales o mejorados con algún aditivo, cuando éstos no cumplen con las exigencias mínimas. Por tanto, no pueden abordarse los problemas de los pavimentos sin tratar de solucionar también los que se presentan en la explanación o cimiento sobre el que se apoya la estructura.

El Grupo de Investigación de Pavimentos y Explanaciones Viales (GIPAVEX), de la facultad de Ingeniería Civil de la CUJAE, desde el año 2008, se trazó como misión desarrollar investigaciones en pavimentos flexibles y rígidos, así como en explanaciones viales, para contribuir con el conocimiento sobre estas estructuras, mejorando su comportamiento ante las solicitaciones del tráfico y la influencia del clima.

Desde el año 2008 el grupo ha trabajado en el desarrollo de métodos de dimensionamiento para pavimentos flexibles y rígidos, teniendo en cuenta las condiciones ambientales, de tráfico y materiales del país; en el diseño de mezclas que permitan la reducción del impacto ambiental negativo que provocan durante el proceso de fabricación, la modelación computacional de pavimentos y terraplenes para estudiar la respuesta de estas estructuras ante la influencia de las cargas; en soluciones para la rehabilitación de pavimentos en explotación, con refuerzo y reciclado de pavimentos; así como en soluciones para mejorar los suelos utilizados como cimiento (subrasante).

En la figura 1 se muestran las investigaciones fundamentales realizadas por el grupo de trabajo, que comprenden varias líneas dentro del diseño y rehabilitación de pavimentos flexibles y rígidos.

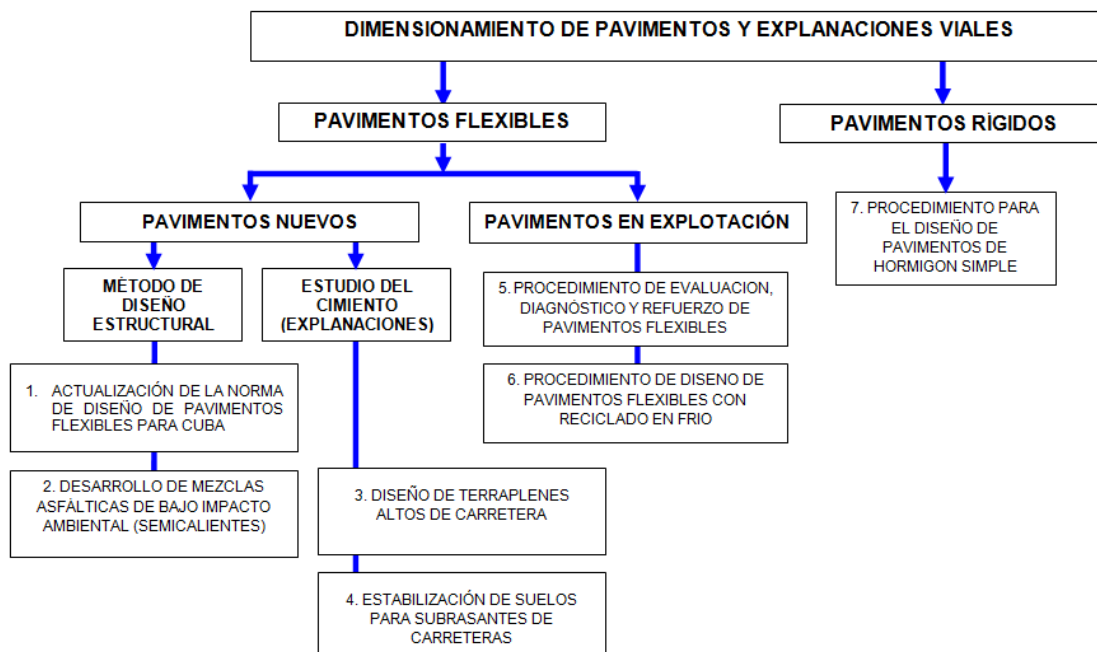


Figura 1. Investigaciones realizadas por el grupo de investigación GIPAVEX desde el año 2008.

2. INVESTIGACIONES REALIZADAS POR EL GRUPO GIPAVEX

2.1. ACTUALIZACIÓN DE LA NORMA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA CUBA

El pavimento flexible es la estructura que tiene la capacidad de adaptarse a pequeños asientos diferenciales sin que se produzcan agrietamientos, manteniendo su integridad estructural y capacidad de transmisión de cargas. En su diseño interviene el tráfico, el clima, la subrasante y los materiales, algunos de estos factores no se corresponden a la situación actual de Cuba, por lo que en esta investigación se realiza una revisión de algunas normas de otros países para luego compararlas con la norma cubana vigente de diseño de pavimentos flexibles.

Como resultado de la investigación se estableció una nueva temperatura de cálculo para las condiciones cubanas, con un 50 % de probabilidad de ocurrencia, a partir de un estudio estadístico dando como resultado 45°C; por tanto, a partir de esta temperatura y mediante los criterios del programa ALIZE se considera una resistencia de 1000 MPa en la mezcla asfáltica densa para la capa de superficie. Se incorporaron nuevas siluetas vehiculares al banco de datos de la norma, lo que implica un incremento del factor camión-eje, así como se modifican los porcentajes de vehículos pesados. Se proponen nuevos espesores mínimos de superficie y se establecieron nuevos coeficientes de equivalencia de espesores para la base y la subbase que cumplen con la ley de comportamiento del pavimento, demostrando también que la variación de la resistencia de la subrasante influye en los espesores reales de la base y la subbase. Todo lo anterior constituyen elementos para la actualización de la NC 334/2004. [1].

2.2. DESARROLLO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DE BAJO IMPACTO AMBIENTAL

Con el propósito de reducir el impacto ambiental que las mezclas asfálticas en caliente provocan al medio ambiente, se han desarrollado en el mundo tecnologías de mezclas con el objetivo de reducir las temperaturas de fabricación o la reutilización de materiales de desechos. Tal es el caso de las denominadas mezclas asfálticas semicalientes, que son producidas a temperaturas inferiores a las convencionales. Estas mezclas se clasifican de acuerdo a la modificación realizada durante el proceso de producción en planta o por el tipo de aditivo empleado, grupo dentro del cual se encuentran los aditivos químicos como las zeolitas sintéticas, las ceras o los tensocativos. En el caso de las técnicas que emplean materiales de desechos se encuentran las mezclas fabricadas con polvo de neumático fuera de uso (PNFU).

En Cuba existen grandes yacimientos de zeolita natural, cuyas propiedades físico-químicas, se ha comprobado que son similares a las sintéticas empleadas en la fabricación de estas mezclas. En la investigación se ha empleado una zeolita natural procedente del yacimiento Tasajeras, con las cual se obtuvieron efectos similares a los obtenidos con la zeolita sintética Aspha-min, lo que se demostró a través de una comparación en laboratorio con ambos aditivos utilizados en mezclas asfálticas [2].

Se probaron a nivel de laboratorio, diferentes granulometrías de zeolita natural, como filler y como arena, para utilizarla como aditivo en una mezcla semicaliente; así como la comparación de la influencia del contenido zeolítico de dos minerales naturales cubanos y la adición de cal hidratada para mejorar la sensibilidad al agua de las mezclas a las que se le añade este aditivo. Para la evaluación de las mezclas se utilizaron los ensayos tradicionales del método Marshall, además de la sensibilidad al agua y el módulo de rigidez.

En cuanto a la adición de zeolita natural cubana añadida en forma de polvo se obtuvieron los mejores resultados con valores entre 0,4 y 0,6 % de zeolita sobre el peso de los

áridos en la fracción filler (polvo). Al añadirla en forma de arena se propone la utilización de 6 a 10 %. Se demostró también que la adición de un 0,5 % de cal hidratada sobre el peso de los áridos, a las mezclas con 0,6 % de zeolita natural cubana, mejora tanto la sensibilidad al agua como la estabilidad y la deformación. Se comprobó, a partir de la comparación entre dos zeolitas cubanas con diferentes contenidos zeolíticos, que este parámetro no ejerce influencia en los resultados de las propiedades de las mezclas, por lo que pueden ser empleadas ambas. También se comprobó que la fracción gruesa de Zeo C (0-4mm) y sus propiedades zeolíticas como mineral, favorecen la estabilidad de las mezclas, obteniéndose resultados similares o superiores a una mezcla convencional de referencia. Se comprueba además que la adición de cal hidratada mejora notablemente los resultados de sensibilidad al agua de las mezclas semicalientes con Zeo C. Estas mezclas se pueden utilizar para tráfico T2 y T3, y en cualquier tipo de mezcla y capa del pavimento, utilizando en su diseño los ensayos Marshall, Sensibilidad al Agua y Rodadura [3].

En relación a los materiales que se comportan como tensoactivos como es el caso del jugo del henequén, ofrece facilidades para emplearlas en investigaciones de las mezclas asfálticas, ya que no es un alimento para el consumo de la sociedad y no se utilizan tierras agrícolas para su plantación, no requieren riego, ni fertilizantes y se emplea muy poca mano de obra, por lo que su costo de producción es muy bajo. Estos aspectos se consideran importantes, ya que no es un producto vital para la economía ni la sociedad del país. Los ensayos demostraron que el jugo de Henequén añadido a temperaturas mayores de 100 °C, provoca un efecto de espumado en el asfalto, lo que facilitaría la reducción de la temperatura de producción de las mezclas y con esto el impacto ambiental provocado. Se comprobó también que la adición de jugo de Henequén facilita el empleo de asfaltos más duros en las mezclas asfálticas, por los aumentos que se experimentan en los valores de penetración y ductilidad. Es posible diseñar mezclas asfálticas semicalientes con jugo de Henequén a 110 °C ya que se obtienen valores de penetración y ductilidad aceptables, según la norma cubana. Al añadir 1 % de jugo con 4,5 % de asfalto, se obtienen resultados comparables con la mezcla patrón. Se evidenció la relación entre el porcentaje de jugo de Henequén y el de asfalto, de manera que para menores contenidos de jugo, se obtienen resultados favorables con bajos contenidos de asfalto y viceversa [4].

En cuanto a la adición de PNFU, estos materiales son acumulados en vertederos clandestinos o quemados a cielo abierto sin los cuidados que requiere. Esto afecta el paisaje y degrada la imagen de las comunidades aledañas. Provoca la acumulación de aguas de lluvia y consecuentemente, la proliferación de vectores. Por su naturaleza combustible, existe un peligro real de que las grandes acumulaciones entren en combustión en condiciones de poco oxígeno, desencadenando procesos de pirolisis con desprendimientos de sustancias altamente contaminantes o cancerígenas. Una manera de revertir los efectos negativos antes expuestos es la posibilidad de consumir grandes cantidades de neumáticos en su etapa de residuo para la elaboración de mezclas asfálticas, lo cual, además de beneficiar al medio ambiente, también lo hará a la economía, no sólo por el uso de una materia prima barata, sino también porque se pudiera contar con una red vial de más calidad. Como resultado de trabajos desarrollados se ha investigado sobre el porcentaje de PNFU a añadir, la granulometría de dicho aditivo, para lograr condiciones favorables de las mezclas asfálticas, el tiempo de maceración, así como la relación entre el porcentaje de asfalto y de PNFU, con el objetivo

de obtener condiciones favorables de las mezclas asfálticas. En este sentido se obtienen buenos resultados al añadir 1 % de PNFU de la fracción fina (<0,5 mm) con un tiempo de maceración de 60 min. Se demostró también que para la gruesa es necesario un tiempo de maceración de 90 min [5].

2.3. DISEÑO DE TERRAPLENES ALTOS DE CARRETERA

En esta investigación se emplea la modelación numérica como herramientas para la obtención de especificaciones de diseño de terraplenes de carretera hasta 30 m de altura. Se propusieron diferentes especificaciones a tener en cuenta en el diseño de terraplenes de carretera, a partir de la evaluación del comportamiento del estado tenso – deformacional, que fueron: pendientes de taludes estables para cada altura del terraplén y resistencia del cimiento, limitaciones en la calidad del cimiento dependiendo de la altura del terraplén y limitaciones en el empleo de los métodos analíticos con modelo constitutivo lineal-elástico [6].

En este tema se obtuvo un modelo numérico que caracteriza el estado tenso-deformacional de terraplenes de carretera en estado de deformación plana, mediante el cual se obtuvo un dominio de aplicación del método analítico clásico de sumatoria de capas en cuanto al modelo constitutivo; lo que permite simular el comportamiento del terraplén durante su construcción sobre el cimiento natural. Se dan recomendaciones para el empleo de diferentes condiciones de frontera y modelos constitutivos si se desea emplear la modelación computacional como herramienta de solución. Se comprobó que son más confiables las ligaduras lineales horizontales y verticales, ya que no presentan restricciones en cuanto al modelo constitutivo. Fue definida también la potencia activa de 0.60B para el diseño de terraplenes. Otros aportes realizados que se reflejan a lo largo del trabajo lo constituyen la metodología para la calibración matemática de un modelo numérico MEF de forma simultánea y la metodología para la evaluación del estado tenso-deformacional del terraplén empleando una herramienta computacional; así como la clasificación de “terraplén alto” de carretera en función de las propiedades físico-mecánicas del suelo del cimiento y el procedimiento de diseño para el terraplén de carretera con los nuevos aportes obtenidos en la presente investigación [7].

2.4. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS DE SUBRASANTES DE CARRETERAS

En la actualidad existen diferentes alternativas como métodos de estabilización química, entre los que se encuentran: suelo-cal, suelo-cemento, suelo con productos asfálticos, suelos arcillosos con aceites sulfonados, suelos-ácidos inorgánicos, suelos con productos resinosos, suelos con cenizas pulverizadas, entre otros, utilizados en el mejoramiento y estabilización de terraplenes o suelos de soporte del pavimento, como también como partes de la propia estructura, en bases o sub-base.

Desde hace varios años se desarrolla una investigación con el propósito de crear un procedimiento de estabilización de suelos utilizando sales cuaternarias de amonio, de cuyos resultados parte el procedimiento denominado ROCAMIX, con el que se han alcanzado apreciables ventajas por su economía y fácil empleo. Con este sistema de estabilización se consigue un significativo incremento de la resistencia, así como la reducción de la permeabilidad de los suelos [8, 9].

La estabilización de suelos, además de las ventajas económicas, contribuye a la protección del medio ambiente, en momentos en que la exigencia mundial en este

sentido es cada vez mayor, ya que se reduce la necesidad de utilización de fuentes de préstamos, con grandes movimientos de tierras y altos consumos de combustibles.

2.5. PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN, DIAGNÓSTICO Y REFUERZO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

Sobre la base de las estructuras establecidas en los catálogos de la norma SATCC (de Sudáfrica), el uso de programas para la modelación de los pavimentos (Alize y JULEA) para obtener la respuesta de las estructuras y las mediciones de las deflexiones realizadas con la Viga Benkelman o el Deflectómetro de Impacto (FWD), se obtienen diversas expresiones matemáticas, utilizando la deflexión máxima o el cuenco de deflexión respectivamente, lo que permite estimar el módulo de la subrasante, la condición de cada una de las capas de la estructura del pavimento y los espesores necesarios de refuerzo. Con la viga Benkelman se utiliza la deflexión máxima y el radio de curvatura y con el FWD, la deflexión máxima y los parámetros del cuenco de deflexión [10].

La propuesta desarrollada incluye la evaluación, diagnóstico y solución de rehabilitación de pavimentos flexibles. Se complementa la evaluación de las condiciones estructurales utilizando la evaluación visual subjetiva y objetiva. Permite uniformar los métodos de proyectos de rehabilitación de pavimentos, contemplando las condiciones climáticas, el tráfico y los materiales más utilizados en una red de carreteras. El procedimiento es completamente aplicable a las condiciones de Cuba, considerando las características propias del país.

Se verificaron los resultados del procedimiento a través de un caso de estudio, en un tramo de carreteras de 48 km de la red fundamental de Angola, comprobándose la validez del procedimiento propuesto, con el cual se reducen los sondeos, además de lograr una mayor racionalidad en el cálculo del espesor de refuerzo. La evaluación estadística y la comparación entre los procedimientos propuestos indican buenos resultados y permiten una mejor evaluación que las utilizadas solamente con la deflexión máxima como es realizada en varios métodos de diferentes órganos de carreteras [11].

2.6. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES CON LA APLICACIÓN DEL RECICLADO EN FRÍO

El daño medioambiental que provoca la explotación y extracción de recursos naturales para las construcciones viales y la necesidad de solucionar los grandes volúmenes de materiales que se vierten producto de las labores de rehabilitación de los pavimentos ha incentivado el desarrollo de técnicas que reutilicen los materiales de la vía en explotación, surgiendo así la técnica de reciclado. Esta puede realizarse in situ o trasladando los materiales resultantes de fresado del pavimento hacia una planta de fabricación para su procesamiento. En ambos casos, se puede recurrir a técnicas en frío o en caliente. Durante el proceso se puede adicionar un ligante (emulsiones bituminosas, conglomerantes hidráulicos o asfalto espumado) que mejore las propiedades físico – mecánicas de la mezcla.

En Cuba no existen normas que regulen el empleo de la técnica del reciclado en ninguna de sus formas. La norma vigente para diseñar pavimentos flexibles (NC 334/2004) (Oficina Nacional de Normalización, 2004), no incluye como variante estructuras con capas de materiales reciclados.

El resultado de esta investigación es un procedimiento de diseño para pavimentos rehabilitados empleando la técnica de reciclado en frío de la base bajo el principio de diseño de la NC: 334/2004 [12]. Se obtiene un espesor total de pavimento equivalente considerando el tráfico de diseño y el aporte, en términos de resistencia, de las capas que no son removidas durante el proceso de fresado/reciclado. Este espesor total equivalente se divide en espesores de superficie y de base que luego se transforman a espesores reales mediante coeficientes de equivalencia. Para el espesor de base reciclada los coeficientes de equivalencia se determinaron analíticamente y para la capa asfáltica se mantuvieron los que aparecen en la norma cubana de diseño de pavimentos flexibles [13].

2.7. PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS DE HORMIGÓN SIMPLE

El trabajo tiene como objetivo principal elaborar un procedimiento que permita diseñar pavimentos de hormigón simple siguiendo el criterio de fatiga y considerando las condiciones de materiales y solicitaciones de Cuba. Se identifican los factores fundamentales para la modelación y diseño de estos pavimentos, haciendo énfasis en los modelos de comportamiento a fatiga, cuya ley empírica determina el número de repeticiones admisibles en la losa como función de la relación entre la tensión en el borde debido a las cargas y el módulo de rotura del hormigón. La simulación numérica combinada con experimentación se emplea como herramienta para evaluar el comportamiento [14].

Se establecieron las bases conceptuales para los modelos numéricos (1- Modelo tridimensional de sistema pavimento-cimiento, 2 – Modelo axial simétrico para la modelación de ensayos de placa, 3 - Modelo en 3D para la modelación del módulo de rotura), que permiten realizar los estudios el comportamiento de pavimento rígidos en las condiciones cubanas con el empleo combinado de técnicas de experimentación, modelación numérica y la estadística, evaluándose con ello el porcentaje de fatiga consumida por la losa de pavimento de hormigón, como base para su diseño en las condiciones de Cuba.

Concebidas, establecidas y validadas las herramientas de investigación se llegaron a analizar la influencia de los factores de diseño en la respuesta estructural de las losas de hormigón simple, mediante el empleo de modelos numéricos previamente calibrado y validado, para simular las condiciones de trabajo de los pavimentos en Cuba. Los resultados obtenidos a través de las complejas técnicas de modelación numéricas fueron transformados en criterios y elementos básicos convencionales comprensibles para los ingenieros en la práctica profesional del área de diseño de pavimentos rígidos.

Definidos los modelos numéricos, se realiza un análisis de influencia para seleccionar el factor predominante y analizar las posibles condiciones de diseño en Cuba. Como resultado novedoso, se proponen gráficos y tablas que facilitan el trabajo de los diseñadores, con un modelo probabilístico que permite determinar el número de repeticiones admisibles, donde se introduce la confiabilidad como un factor en el diseño. Finalmente, se propone el procedimiento para el diseño y revisión siguiendo el criterio de fatiga, y se aplica a un proyecto ya ejecutado, como caso de estudio, para comparar sus resultados con la solución dada en el proyecto, que fue diseñado con el método de la Portland Cement Association (PCA), demostrándose que con el método propuesto se

pueden obtener menores espesores de losa, lo que implica reducción en los costos de construcción [15].

3. CONCLUSIONES

En relación con la actualización de la norma cubana de diseño de pavimentos flexibles y semirrígidos, se definen las variables y parámetros que intervienen en el diseño de pavimentos flexibles y semirrígidos como son: porcentajes de vehículos pesados, temperatura de cálculo, resistencia de la mezcla asfáltica densa, espesores mínimos de superficie y coeficientes de equivalencia de espesores para la capa de base y subbase; para la actualización de la NC 334/2004.

La línea de investigación sobre el diseño de mezclas semicalientes demostró la semejanza en la composición química de la zeolita natural de Cuba con las sintéticas utilizadas internacionalmente y la posibilidad de utilizar las especificaciones de los materiales y equipos empleados para las mezclas convencionales, lo que representa una alternativa viable para fabricar mezclas semicalientes en Cuba con resultados sostenibles en la producción de mezclas asfálticas.

Se demuestra el potencial del jugo del Henequén como tensoactivo para el empleo en las mezclas asfálticas con el objetivo de reducir la temperatura de fabricación. Se modifican favorablemente características del asfalto como la penetración y la ductilidad, permitiendo emplear asfaltos más duros a menores temperaturas. Las mezclas fabricadas con jugo de henequén permitieron obtener resultados comparables con la mezcla patrón de referencia.

En cuanto al empleo de PNFU se constata la posibilidad de sustituir materiales naturales como lo áridos y reducir el impacto ambiental que provoca la acumulación de los neumáticos en desuso. Se determinó la granulometría del PNFU y el contenido a añadir con mejores resultados a partir de la comparación con una mezcla convencional, así como el tiempo de maceración para las granulometrías finas y gruesas con resultados satisfactorios.

Relacionado con la modelación de terraplenes, los resultados obtenidos son de significativa importancia para la especialidad de viales, ya que se ha utilizado por primera vez la modelación computacional, con un modelo apropiadamente calibrado, lo que ofrece una herramienta eficaz para el diseño y revisión de terraplenes de carreteras, cuya aplicación puede extenderse a terraplenes de las vías férreas.

El resultado sobre la estabilización de suelos de subrasante demuestra las potencialidades de emplear sales cuaternarias de amonio, específicamente el ROCAMIX como alternativa en la mejora de dichos suelos, para las regiones del país donde escasean los materiales adecuados con estos propósitos, y como parte del esfuerzo que el país realiza en función de la protección del medio ambiente y la necesidad de reducir los costos de las inversiones. De la misma forma la reducción de espesores de pavimento, que se logra con una subrasante mejorada, contribuye al ahorro de áridos de calidad y del asfalto, además del ahorro del transporte de materiales. El aprovechamiento de los suelos locales mediante estabilización, en muchos casos, compensa el coste del producto estabilizador.

En línea de investigación sobre evaluación y refuerzo de pavimentos flexibles se obtuvieron expresiones matemáticas basadas en las mediciones deflectométricas para

determinar los módulos de las capas y de la subrasante, que simplifican el procedimiento de retrocálculo. Se verificó la validez del procedimiento propuesto, mediante su aplicación en un caso de estudio, a un tramo de carretera de 48km perteneciente a la red fundamental de carreteras de Angola. Este procedimiento es aplicable a las condiciones de Cuba.

La solución de rehabilitación donde se utilice el reciclado del pavimento para formar una nueva base, es una alternativa factible de utilizar en nuestro país, con grandes ventajas medioambientales, porque representa una reducción de vertederos y del uso de fuentes de materiales vírgenes. Asimismo, se reducen espesores respecto a un pavimento nuevo, contribuyendo a la racionalidad en el nuevo dimensionamiento, debido al aporte de resistencia del cemento formado por los materiales no removidos y por el incremento de resistencia en la base tratada, respecto a los materiales no aglomerados.

El método de diseño desarrollado para pavimentos rehabilitados mediante reciclado, se apoya en la realización de mediciones deflectométricas con la viga Benkelman y de estudios de suelos con el DCP, lo que permite de forma precisa y sencilla evaluar el estado estructural de una carretera, determinar los tramos homogéneos y realizar la solución de diseño más adecuada.

En el tema de la modelación numérica aplicada a los pavimentos de hormigón simple se establecieron las bases conceptuales para los modelos numéricos, que permiten realizar los estudios el comportamiento de pavimento rígidos en las condiciones cubanas con el empleo combinado de técnicas de experimentación, modelación numérica y la estadística, evaluándose con ello el porcentaje de fatiga consumida por la losa de pavimento de hormigón, como base para su diseño en las condiciones de Cuba.

Desde el punto de vista práctico quedó establecido y validado un procedimiento para determinar el consumo de fatiga consumida por la losa de hormigón, a través de la relación entre repeticiones esperadas y admisibles soportados en criterios de fiabilidad. Ha sido posible obtener la respuesta del pavimento mediante modelación numérica, y calcular el porcentaje de fatiga utilizando una ley de fallo que incluye el concepto de confiabilidad, lo que representa un paso importante en la elaboración de la norma diseño para Cuba.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Tejeda Piusseaut, Eduardo / Serrano Rodríguez, Emilio / Ngenokesho, Sirkka. Recomendaciones a la NC 334/2004 para el diseño de pavimentos flexibles, a partir del análisis de la Guía de diseño AASHTO 2004. Monografía. Junio, 2013.
2. Alonso Aenlle, Anadelys / Tejeda Piusseaut, Eduardo / Moreno Navarro, Fernando / Rubio Gámez, M.C. / Medel Perallón, E. Estudio de laboratorio sobre utilización de zeolita natural versus zeolita sintética en la fabricación de mezclas semicalientes. Revista Materiales de Construcción Vol. 63, 310, 195-217 abril-junio 2013. ISSN: 0465-2746 eISSN: 1988-3226 doi: 10.3989/mc.2013.0591.
3. Alonso Aenlle, Anadelys. Obtención a nivel de laboratorio de una mezcla asfáltica semicaliente a partir de la utilización de zeolita natural cubana del yacimiento de Tasajeras. **Tesis doctoral**. Año 2012.

4. Alonso Aenlle, Anadelys / Herrera Castellón, Michael. Empleo del jugo del henequén para la producción de mezclas asfálticas semicalientes. XVII Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, Cuba 2014.
5. Álvarez Iglesias, Manuel R. / Serrano Rodríguez, Luis E. Estudio sobre la modificación de los parámetros de las mezclas asfálticas calientes, con la adición del polvo de neumáticos. FECONS 2014.
6. Mesa Lavista, Milena / Álvarez Pérez, José / Tejeda Piusseaut, Eduardo / Recarey Morfa, Carlos A. Determination of the domain dimensions in embankment numerical modeling. DYNA (Thomson-Reuters) ISSN 2346-2183. 2016.
7. Mesa Lavista, Milena. Empleo de la modelación para el diseño de terraplenes altos de carretera. (CUJAE). **Tesis doctoral**. Año 2016.
8. Junco del Pino, Juan Mario / Tejeda Piusseaut, Eduardo. Aditivo químico obtenido de sales cuaternarias empleado para la estabilización de suelos arcillosos de subrasantes de carreteras. Revista Carreteras. N° 183. Mayo-junio 2012.
9. Junco, Juan Mario / Tejeda, Eduardo. Influencia de la actividad de las arcillas en la estabilización de suelos con sales cuaternarias de amonio en Cuba. Revista Carreteras N° 197 - Septiembre / Octubre 2014.
10. Andrade Neto, Carlos / Tejeda Piusseaut, Eduardo. Diseño de refuerzos en pavimentos flexibles adaptando la Norma SATCC a las condiciones de Angola. Revista Carreteras. España. No. 202. Julio-agosto 2015.
11. Andrade Neto, Carlos / Tejeda Piusseaut, Eduardo. Procedimiento de evaluación, diagnóstico y refuerzo de pavimentos flexibles en la Red fundamental de carreteras de Angola. **Tesis doctoral**. Año 2016.
12. Moll Martínez, Reynier /Tejeda Piusseaut, Eduardo / Hernández López/ Félix Michael. Estimación del módulo de elasticidad equivalente a la superficie del conjunto de subbase y subrasante como cimiento para proyectos de reciclado. Revista Carreteras. España. 2017.
13. Moll Martínez, Reynier. "Procedimiento para el diseño estructural de pavimentos flexibles rehabilitados en Cuba con el empleo de bases recicladas utilizando ligantes asfálticos". **Tesis doctoral**. Año 2016. La Habana, Cuba.
14. Hernández López, Félix Michael / Tejeda Piusseaut, Eduardo. Modelación computacional en 3D de un pavimento de hormigón con carga aplicada en el borde. Revista Carreteras N° 199 - Enero / Febrero 2015.
15. Hernández, Félix Michael. Procedimiento para el diseño por fatiga de pavimentos de hormigón simple para las carreteras en Cuba. **Tesis doctoral**. Año 2016.