

## I. INTRODUCCIÓN

El Pavimento Asfáltico Reciclado, mejor conocido como RAP, consiste en el material recuperado de un pavimento flexible que ha alcanzado el final de su vida de servicio; no obstante, sus características permiten reutilizarlo como parte de estructuras nuevas o rehabilitadas. La incorporación de este material en mezclas asfálticas favorece la reducción de nuevo material, generando ahorros a nivel de costos y a su vez contribuyendo a la conservación de los recursos naturales (Copeland, 2011).

El propósito primordial de la implementación del RAP como componente de la mezcla asfáltica se direcciona hacia la sostenibilidad, como medida de mitigación del impacto ambiental producto de la reutilización de un material de desecho con alto potencial mecánico y reducción en la extracción de fuentes de agregados. Por otro lado, en el ámbito económico, la sustitución de un porcentaje de material de mezcla asfáltica representa un ahorro en la cantidad de ligante asfáltico y agregados vírgenes requeridos para la producción de la mezcla, impactando el costo del producto final.

Las características mecánicas del RAP, así como su papel como potencial abarataador de la mezcla asfáltica, representan tan sólo algunos de los beneficios del material. No obstante, la implementación de la técnica demanda buenas prácticas, las cuales deben estar presentes tanto en los procesos de recuperación, triturado e incorporación del material, asegurando la correcta distribución y recubrimiento de las partículas de agregado para garantizar el aporte a las propiedades de la mezcla asfáltica final.

### 1.1. Definición

El Pavimento Asfáltico Reciclado (RAP) o Reclaimed Asphalt Pavement corresponde al material recuperado de la carpeta asfáltica de un pavimento removido producto de una reconstrucción o rehabilitación. De acuerdo con Han, Thakur, Chong y Parsons (2011), tanto el agregado como el ligante asfáltico que conforman el RAP aún poseen la capacidad de aportar ciertas propiedades en una nueva estructura de pavimento.



Figura 1. Material de RAP

## **1.2. Aplicaciones**

La Federal Highway Administration (FHWA, por sus siglas en inglés) define las principales aplicaciones del uso de RAP en la construcción y mantenimiento de carreteras, según se define a continuación (Han, Thakur, Chong y Parsons, 2011):

### **1.2.1. Agregado de una base**

El agregado del RAP es procesado y mezclado con material virgen para producir agregado para bases o subbases granulares como componentes de la estructura de pavimento. Huntington, Khaled & Koch (2013) intervinieron 4 carreteras de lastre ubicadas en el Condado de Jhonson y el Condado de Sweetwater, ambos en Wyoming, las cuales fueron construidas en diferentes tramos con porcentajes de agregado RAP entre el 50 y el 80 %. En el desarrollo del proyecto se identificaron problemas de mezclado y compactación de RAP. Los autores enfatizan en posibles problemas de segregación del material a largo plazo.

### **1.2.2. Agregado de bases estabilizadas**

EL RAP es procesado y mezclado con agentes estabilizadores y compactado de manera que obtenga una mayor capacidad mecánica en la mezcla final. Al-Harty, Al-Shamsi, Al-Zubeidi, & Taha, desarrollaron en el 2002 una investigación en Omán, en donde se utilizaron porcentajes de RAP desde el 70 hasta 100 %. De la investigación, los autores concluyen que esta aplicación permite una disminución en el espesor de la capa requerida en comparación con una base granular convencional.

### **1.2.3. Material de relleno**

El RAP se ha sido utilizado como relleno de construcción; no obstante, no se recomienda esta práctica puesto que se subestima el valor económico que puede aportar el RAP.

### **1.2.4. Recuperación de la totalidad de la profundidad**

Este método consiste en recuperar y pulverizar la totalidad del agregado que conforman espesores de la carpeta asfáltica, base y subbase. En algunos casos se requiere la adición de agregados vírgenes, los cuales son mezclados hasta obtener un material homogéneo.

### **1.2.5. Mezcla asfáltica**

La aplicación en mezcla asfáltica puede ser implementado a partir de dos métodos: procesamiento en planta y reciclado en campo. El primero de ellos consiste en el mezclado del RAP con los materiales de la mezcla asfáltica nueva, para ello el material de RAP es procesado hasta obtener la gradación requerida, posteriormente se realiza el proceso de mezclado con agregado y asfalto virgen, en algunos casos con agentes rejuvenecedores hasta obtener la mezcla asfáltica requerida. El segundo método de ellos consiste en el reciclado en campo, en el cual el material de RAP se utiliza con las características con las que fue recuperado en campo. En este caso la superficie del pavimento es fresada hasta una profundidad de 150 mm y combinado con emulsión asfáltica para posteriormente ser colocado y compactado a partir del procedimiento convencional. En ambos casos se debe tomar en cuenta el aporte que puede tener el asfalto del RAP en la mezcla final.

### **1.2.6. Otras aplicaciones**

Otra de las aplicaciones comprende la utilización de RAP en bloques de asfalto como adoquines, de acuerdo a las investigaciones desarrolladas por Abdelgalil & Nor (2014), Jenkins (2000), Armijos (2011) y por la empresa HANOVER de los Estados Unidos (HANOVER). La investigación liderada por Marín (2016) evaluó el desempeño de un tramo experimental construido con adoquines conformados con material de RAP, a nivel de planta se identificaron problemas de cohesión en la mezcla para contenidos por encima de 25% de RAP. Consistente con los hallazgos anteriores, se recomienda la utilización de este material para caminos de bajo volumen.

El enfoque del reciclaje de pavimentos flexibles resulta un aporte valioso desde el punto de vista técnico, económico y

ambiental (Kennedy, Tam & Solaimanian, 1998). A continuación, se presentan las principales ventajas de su utilización como material sustituto de una fracción de la mezcla asfáltica.

## II. BENEFICIOS DE LA UTILIZACIÓN DE RAP

El enfoque del reciclaje de pavimentos flexibles resulta un aporte valioso desde el punto de vista técnico, económico y ambiental (Kennedy, Tam & Solaimanian, 1998). A continuación, se presentan las principales ventajas de su utilización como material sustituto de una fracción de la mezcla asfáltica.

### 2.1. Beneficios ambientales

Los beneficios a nivel ambiental producto de implementación de mezclas asfálticas con RAP comprenden:

- Reutilización de material que ha finalizado su vida útil.
- Disminución del volumen de botaderos.
- Disminución de suministro de material virgen.
- Reducción en los procesos de extracción de materias primas limitadas.

A nivel país, la técnica se enmarca dentro de la marca registrada de Pavimentos Verdes en la línea de la Sostenibilidad que persigue el cumplimiento de la Meta Carbono Neutralidad 2100, de modo que los beneficios señalados pueden ser cuantificados a través de la medición de la huella de carbono. Esta corresponde a una medida de la emanación de dióxido de carbono hacia la atmósfera, causada directa o indirectamente por una actividad determinada (Wiedmann & Minx, 2008).

#### 2.1.1. Estimación de la huella de carbono

Los procesos contemplados en el análisis de ciclo de vida (LCA, por sus siglas en inglés) de un pavimento que tienen una huella de carbono asociada corresponden a: la extracción de materias primas (particularmente el asfalto) (Cass & Mukherjee, 2011), el transporte de las materias primas y del producto terminado (Mohod Rosi Mohd & You, 2015), el proceso de producción de la mezcla asfáltica y el uso de maquinaria durante la colocación y compactación de la misma (Kim, Lee, Park, & Kim, 2012). Las emisiones de CO<sub>2</sub> en estas etapas están relacionadas al consumo de energía eléctrica y a la quema de combustibles fósiles principalmente. A este tipo de emisiones se les clasifica como indirectas. Sin embargo, los procesos de obtención del combustible, así como del asfalto, por su naturaleza emanan GEI (Gases Efecto Invernadero), por lo que son clasificados como emisiones directas (Kang, Yang, Ozer, & Al-Qadi, 2014). Las emisiones tanto indirectas como directas pueden estimarse mediante el uso de bases de datos y herramientas de cómputo (Mukherjee, Stawowy, & Cass, 2013). Tales herramientas permiten calcular la cantidad de CO<sub>2eq</sub> (Dióxido de Carbono Equivalente) liberado durante los procesos destilación del crudo de petróleo, así como durante la producción de energía eléctrica y la quema de combustibles fósiles (U.S. Department of Energy, 2016). Los valores de estas emanaciones están estrechamente relacionadas al origen del crudo y al tipo de electricidad que se genere (Kim et al, 2012), por lo que es necesario corroborar que los datos utilizados correspondan a los materiales empleados en la región.

La estimación de la huella de carbono del LCA de una mezcla asfáltica requiere del conocimiento del diseño de la mezcla, tiempo y temperaturas de producción, la cantidad de combustible utilizado por los vehículos y maquinaria, entre otros. En el caso del RAP deberá documentarse el proceso de remoción de la superficie, traslado, trituración, incorporación en la mezcla y demás elementos que sean requeridos. Con base en esta información y los parámetros asociados a cada proceso obtenidos de diferentes bases de datos, es posible calcular la cantidad de CO<sub>2eq</sub> emanado durante cada etapa.

### 2.2. Beneficios económicos

Desde el punto de vista económico se asocian los siguientes beneficios:

- Reducción de costos en pavimentación.
- Ahorro en importación y extracción de materia prima (asfalto y agregados).
- Disminución en los tiempos de intervención.

- Disminución en las importaciones de los productos asociados a la obra.
- Reducción en los porcentajes de ligante asfáltico requerido en la mezcla.

Numerosas agencias internacionales han reportado ahorros significativos en los procesos constructivos producto del uso de RAP (Page & Murphy, 1987 y Al-Qadi, Carpenter & Elseifi, 2007). Se ha documentado que los costos constructivos pueden reducirse entre un 14 y un 32 % en mezclas que incorporan porcentajes de RAP entre el 20 y 50 % (Kandhal & Mallick, 1997). Por su parte, Méndez (2015) reporta una disminución de hasta un 7.5 % en el costo de la mezcla producto de la reducción en el uso de materias primas, sin generar un detrimento en las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas que incorporan RAP.

### III. CONSIDERACIONES DE LA INCORPORACIÓN DE RAP EN LA MEZCLA ASFÁLTICA

#### 3.1. Características del RAP

El RAP consiste en un material que ha experimentado un proceso de envejecimiento y endurecimiento progresivo durante la vida de servicio producto de diversos mecanismos que definen las características del ligante, según Roberts, Kandhal, Brown & Kennedy (1996), Tyrion (2000) y Karlsson & Isacsson (2006), estos procesos corresponden a:

- Oxidación por reacción de difusión entre la carpeta y el oxígeno en el aire.
- Volatilización por evaporación de los componentes más ligeros, especialmente durante la construcción.
- Polimerización por reacción química de componentes moleculares.
- Tixotropía debido a la formación de una estructura dentro de la carpeta de asfalto durante un largo período de tiempo.
- Sinéresis debido a la exudación de finos componentes aceitosos.
- Separación a través de la eliminación de componentes grasos, resinas y asfaltenos por agregados absorbentes.

La combinación de ligante virgen con ligante envejecido puede conducir a la formación de conglomerados entre el agregado y el material de relleno (filler) lo cual afecta los procesos de mezclado debido a la dificultad de penetración del asfalto virgen al ser incorporado (Oliver, 2001). En la misma línea, se ha demostrado que existe un efecto del precalentamiento del RAP previo al mezclado, lo cual incide sobre el tiempo de mezclado entre asfaltos vírgenes y envejecidos y el grado de desempeño del ligante combinado (Stephens, Mahoney & Dippold, 2001).

#### 3.2. Desempeño de la mezcla asfáltica

La evaluación del desempeño de mezclas con RAP se ha enfocado en ensayos de fatiga, deformación permanente y daño por humedad. De acuerdo a ello algunos autores han detectado que la resistencia a la fatiga decrece conforme se incrementa el contenido de RAP en la mezcla (Alarcón, 2003, Murillo, 2016 y Marín, 2016). En contraposición, Petho & Denneman (2016) afirman que es posible diseñar mezclas con 60 % de RAP obteniendo el mismo desempeño a la fatiga en comparación con mezclas convencionales.

En cuanto al módulo de la mezcla y la deformación permanente, se detecta una tendencia creciente a medida que el contenido de RAP aumenta, producto de la rigidez del material de RAP respecto a la mezcla virgen (Alarcón, 2003, Marín, 2016, Cimpeanu, 2017, Centeno, M., Martínez, A., Miro, R., Pérez, J., 2008, Al-Qadi, I., Carpenter, S., Elseifi, M., 2007). Nuevamente, Petho & Denneman, (2016) defienden la posición de que no existe ninguna afectación en este parámetro para mezclas diseñadas adecuadamente hasta un 60% de RAP.

Los diferentes hallazgos en cuanto al desempeño de la mezcla asfáltica son consistentes en el tanto que las propiedades analizadas dependerán de las propiedades intrínsecas del RAP. Sánchez, Grenfell, Airey & Caro (2017) aseguran que la heterogeneidad del RAP es una fuente importante de incertidumbre, lo cual incide en la variabilidad de la respuesta y desempeño de mezclas asfálticas que incorporan este material.

### 3.3. Variabilidad

El RAP, como material recuperado de un pavimento, puede contener material del pavimento original, sobrecapas, baches, sellos u otros tratamientos de mantenimiento (McDaniel & Anderson, 2001), convirtiéndolo en un material altamente variable en composición. Al mismo tiempo, las propiedades del material dependen del nivel de daño que ha experimentado el pavimento durante su vida útil (Smiljanic, Stefanovic, Neumann, Rahimaian & Jovanovic, 1993), lo cual aumenta la dispersión en el comportamiento esperado de la mezcla final.



Figura 2. Almacenamiento del RAP

El manejo de los apilamientos consiste en otra fuente de variabilidad. La correcta implementación de material de RAP dentro de la mezcla asfáltica implica el desarrollo de técnicas adecuadas para el almacenamiento y procesamiento del RAP, en busca de lograr un material más homogéneo. Debe considerarse que largos periodos de almacenamiento de material de RAP aceleran los procesos de oxidación debido a la exposición directa del aire (McMillan & Palsat, 1985), lo cual revela la necesidad de controlar el almacenamiento del material recuperado, según se aprecia en la Figura 2.

## IV. RECOMENDACIONES DE DISEÑO

El alto potencial del RAP como componente de la mezcla asfáltica ha conducido al desarrollo de guías de diseño y pruebas técnicas de campo (McDaniel & Anderson, 2001) con el objetivo de definir los procedimientos mínimos que permitan generar un producto final de calidad. A continuación, se presentan algunas recomendaciones a considerar en el diseño de mezclas asfálticas con RAP.

- Conocer los factores que pueden limitar la utilización de RAP en la mezcla, asociados a: tipo de mezcla, tipo de planta, graduación, propiedades de consenso del agregado, propiedades del ligante, capacidad de calentamiento, secado y extracción de la planta, humedad contenida en el RAP y en el agregado virgen, temperatura del agregado virgen, temperatura ambiente del RAP y del agregado virgen.
- Caracterizar el material de RAP a través de la aplicación de métodos de ensayo (Leiva & Vargas, 2017), tales como: extracción del ligante por disolventes (AASHTO T 164), análisis del ligante asfáltico recuperado para la determinación del grado de desempeño AASHTO M 320, granulometría del agregado extraído de las muestras de RAP (AASHTO T 30) y gravedad específica (AASHTO T 84 y T 85). En los casos donde no es posible realizar este tipo de caracterización se recomienda mantener los porcentajes de RAP en rangos por debajo al 20% sobre la totalidad de la mezcla (Al-Qadi, Carpenter & Elseifi, 2014).

- Considerar los cambios volumétricos en la mezcla asfáltica producto de la incorporación de RAP en la mezcla, puesto que el asfalto envejecido pierde propiedades de lubricación y recubrimiento generando un aumento en el porcentaje de vacíos de la mezcla asfáltica (Cimpeanu, 2017).
- Dosificar contenidos de RAP por debajo del 20% en el caso de asfaltos muy deteriorados y por tanto con altas rigideces, puesto que en tales porcentajes no se generan cambios significativos en la mezcla final (Kennedy, Tam & Solaimanian, 1998 y Arash, Solomon, Karki & Bashin, 2014).
- Realizar un diseño de la mezcla completo con el porcentaje de RAP seleccionado, puesto que la determinación del contenido de asfalto virgen requerido en una mezcla asfáltica con RAP no se debe limitar a la estimación del porcentaje de ligante presente en el RAP (Huang, 2005), debido a la difusión del asfalto virgen, puesto que la capa de asfalto que rodea al agregado grueso tiene una mayor tendencia a mezclarse con el asfalto virgen que con en el agregado fino (Stephens et al. 2001).
- Evaluar la necesidad de incorporar agentes rejuvenecedores para mejorar las propiedades del ligante envejecido, los cuales facilitan la separación del material reciclado favoreciendo el recubrimiento del asfalto virgen (Roberts, Kandhal, Brown & Kennedy, 1996).
- Mantener buenas prácticas en el manejo de los apilamientos de RAP con el objetivo de mantener una baja variabilidad. Sin embargo, adicionalmente se recomienda que los apilamientos sean almacenados de acuerdo a su fuente, manteniendo mayor homogeneidad. En caso de que se utilicen materiales de diferentes proyectos se debe garantizar un correcto mezclado (McDaniel & Anderson, 2001), lo cual implica un procesamiento mediante trituración o tamización que favorece la eliminación de sobretamaños.

## V. CONCLUSIÓN

El conocimiento de las bondades y limitaciones de la incorporación de RAP en la mezcla asfáltica consiste en una herramienta valiosa para la implementación de la técnica en Costa Rica. Diferentes locaciones alrededor del mundo cuentan con tramos construidos que respaldan la técnica, tales como Georgia, (Kandhal, Rao, Watson & Young, 1995), Louisiana (Paul, 1996), Barcelona (Centeno, Martínez, Miro & Perez, 2008), España (Gonzalo, Martínez, Pérez y Valdés, 2008), Illinois (Al-Qadi, et al., 2014), Colombia (Hernández, 2014), Australia (Petho & Denneman 2016). Tales experiencias, así como las recomendaciones de diseño y buenas prácticas dan paso a la aplicación de técnicas innovadoras con numerosos aportes económicos y ambientales que resultan en una mejor infraestructura vial para Costa Rica.

## VI. REFERENCIAS DE CONSULTA

- Abdelgalil, A., & Nor, H. (2014, February). The Effect of Joint on Structural Performance of Asphalt Block Pavements. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 7(8), 1612-1617.
- Alarcón, J. (2003). Estudio del comportamiento de mezclas bituminosas recicladas en caliente en planta. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya, Escuela de ingeniería civil y ambiental, España. Recuperado de: <https://www.tdx.cat/handle/10803/5906>
- Al-Harty, A., Al-Shamsi, K., Al-Zubeidi, M., Taha, R. (2002). Cement stabilization of reclaimed asphalt pavement aggregate for road bases and subbases. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 14, 06/2002, pág. 239-245, Estados Unidos. Recuperado de: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290899-1561%282002%2914%3A3%28239%29>
- Al-Qadi, I., Carpenter, S., Elseifi, M. (2007). Reclaimed asphalt pavement: a literature review. Illinois Center for Transportation, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Estados Unidos.

Arash, M., Solomon, N., S., Karki, P. & Bashin 2014. Fatigue and Fracture Properties of Aged Binders in the Context of Reclaimed Asphalt Mixes. Final Report. Texas A&M Transportation Institute.

Cass, D., & Mukherjee, A. (2011). Calculation of Greenhouse Gas Emissions for a Highway Construction Operations by Using a Hybrid Life-Cycle Assessment Approach: Case Study for Pavement Operations. *Journal of Construction Engineering and Management*, 137 (11), 1015-1025.

Cimpeanu, R. (2017). Efecto de las condiciones de mezclado en las propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas recicladas en caliente. Universidad Politécnica de Catalunya, Escuela de ingeniería civil y ambiental, España. Recuperado de: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/107978>

Copeland, A. (2011). Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: State of the practice (Publication No. FHWA-HRT-11-021).

Gonzalo, A., Martínez, R., Perez-Jimenez, F., Valdés, V. (2008). Estudio de Variabilidad en Mezclas Asfálticas en Caliente Fabricadas con Altas Tasas de Material Asfáltico Reciclable (RAP). *Revista de la Construcción*, vol. 7, 1/2008, pág. 60-71, Chile. Recuperado de: <https://repositorio.uc.cl/bitstream/handle/11534/11412/000511190.pdf?sequence=1>.

Han, J., Thakur, S., Chong, O., & Parsons, R. (2011). Laboratory Evaluation of Characteristics of Recycled Asphalt Pavement in Kansas. Kansas: Kansas Department of Transportation.

HANOVER. (s.f). HANOVER. Architectural Products. Retrieved August 2018, from <http://www.hanoverpavers.com/index.php>

Hernández, P. J. (2014). Evaluación del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas utilizando pavimento reciclado, ligantes hidráulicos y emulsiones asfálticas. Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de ingeniería, Colombia. Recuperado de: <http://bdigital.unal.edu.co/50476/1/80898105.2014.pdf>

Huntington, G., Khaled, K., Koch, S. (2013). Performance of Reclaimed Asphalt Pavement on Unpaved Roads. Universidad de Wyoming, Centro de Transferencia de Tecnológica de Wyoming, Estados Unidos. Recuperado de: [https://rosap.nhl.bts.gov/view/dot/26087/dot\\_26087\\_DS1.pdf](https://rosap.nhl.bts.gov/view/dot/26087/dot_26087_DS1.pdf)

Jenkins, K. (2000, September). Mix Design Considerations for Cold and Half-Warm Bituminous Mixes with Emphasis on Foamed Bitumen. Dissertation in fulfillment for degree Doctor of Philosophy. University of Stellenbosch.

Kandhal, P., Rao, S., Watson, D., Young, B. (1995). Performance of Recycled Hot-Mix Asphalt Mixtures in the State of Georgia, National Center for Asphalt Technology, NCAT Report 95-01. Estados Unidos.

Kang, S., Yang, R., Ozer, H., & Al-Qadi, I. (2014). Life-Cycle greenhouse gases and energy consumption for material and construction phases of pavement with traffic delay. *Transportation Research Record*, 2428, 27-34.

Kennedy, T. W., Tam, W. O. & Solaimanian, M. 1998. "Optimizing Use of Reclaimed Asphalt Pavement with the SuperPave System," *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 67, pp. 311-333.

Kim, B., Lee, H., Park, H., & Kim, H. (2012). Framework for Estimating Greenhouse Gas Emissions Due to Asphalt Pavement Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 138 (11), 1312-1321.

Leiva, F & Vargas, A. (2017). Mejores prácticas para diseñar mezclas asfálticas con pavimento asfáltico recuperado (RAP). *Revista Infraestructura Vial / LanammeUCR*, 19(33), 35-44.

Marín, C. R. (2016). Pavimentos articulados de bloques asfálticos con RAP y análisis estructural a través de un modelo físico experimental. Tesis para optar por el grado de Doctor en Ciencias de la Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de ingeniería, Chile. Recuperado de: <https://repositorio.uc.cl/handle/11534/21386>

McDaniel, R & Anderson, R. M. (2001). NCHRP Report 452. Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method: Technician's Manual. Washington, D.C.

Méndez, A. (2015). Evaluación técnica y económica del uso de pavimento asfáltico reciclado (RAP) en vías colombianas. Tesis de grado. Universidad Militar Nueva Granada, Facultad de ingeniería, Colombia. Recuperado de: <https://repositorio.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/13208/1/EVALUACION%20DE%20EL%20USO%20DE%20PAVIMENTO%20ASFALTICO%20RECICLADO%20EN%20VIAS%20COLOMBIANAS.pdf>

Mohod Rosi Mohd, H., & You, Z. (2015). Estimation of cumulative energy demand and green house gas emissions of

ethanol foamed WMA using life cycle assessment analysis. *Construction and Building Materials*, 93, 117-124.

Mukherjee, A., Stawowy, B. & Cass, D. (2013). Project Emission Estimator. Tool for Contractors and Agencies for Assessing Greenhouse Gas Emissions of Highway Construction Projects. *Transportation Research Record*, 2366, 3-12.

Oliver, J. W. H., "The Influence of the Binder in RAP on Recycled Asphalt Properties," *International Journal of Road Materials and Pavement Design*, Vol. 2, No. 3, 2001, pp. 311- 325.

Paul, H. R. 1996. "Evaluation of Recycled Projects for Performance," *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 65, pp. 231-254.

Petho, L., Denneman, E. (2016). Maximising the use of reclaimed asphalt pavement in asphalt mix, Field evaluation. Austroroads, Australia. Recuperado de: <https://www.onlinepublications.austroroads.com.au/items/AP-R517-16>

Roberts, F. L., P. S. Kandhal, E. R. Brown, D. Lee, and T. W. Kennedy, T. W. 1996. *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction*, 2nd Edition, Napa Education Foundation, Lanham, MD.

Sánchez, D. B., Grenfell, J., Airey, G., & Caro, S. (2017). Evaluation of the degradation of fine asphalt-aggregate mixtures containing high reclaimed asphalt pavement contents. *Road Materials and Pavement Design*, 18(sup2), 91-107.

Smiljanic, M., J. Stefanovic, H.-J. Neumann, I. Rahimaian, & J. Jovanovic. (1993). "Aging of Asphalt on Paved Roads -Characterization of Asphalt Extracted from the Wearing Courses of the Belgrade-Nis Highway," *Journal of Erdol and Kohl*, Vol. 46, No. 6, Hamburg, Germany.

Stephens, J. E., J. Mahoney, and C. Dippold, Determination of the PG Binder Grade to Use in a RAP Mix, Report No. JHR 00-278, Connecticut Department of Transportation, Rocky Hill, CT, 2001.

U. S. Department of Energy. (2016). *Energy Systems*. Recuperado el 24 de febrero de 2017, de <https://greet.es.anl.gov>

Wiedmann, T., & Minx, J. (2008). A Definition of 'Carbon Footprint. En *Economics Research Trends* (págs. 1-11). Hauppauge NY: Nova Science Publishers.



LanammeUCR

## LABORATORIO NACIONAL DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

# PITRA

Programa de  
**Infraestructura del Transporte**

Ing. Luis Guillermo Loría-Salazar, Ph.D.

*Coordinador General*

Ing. Fabián Elizondo-Arrieta, MBA

*Subcoordinador*

### UNIDADES

#### **Unidad de Auditoría Técnica (UAT)**

Ing. Wendy Sequeira-Rojas, M.Sc

*Coordinadora*

#### **Unidad de Seguridad Vial y Transporte (USVT)**

Ing. Diana Jiménez-Romero, M.Sc, MBA

*Coordinadora*

#### **Unidad de Normativa y Actualización Técnica (UNAT)**

Ing. Raquel Arriola-Guzmán

*Coordinadora*

#### **Unidad de Materiales y Pavimentos (UMP)**

Ing. José Pablo Aguiar-Moya, Ph.D.

*Coordinador*

#### **Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional (UGERVN)**

Ing. Roy Barrantes-Jiménez M.Sc

*Coordinador*

#### **Unidad de Gestión Municipal (UGM)**

Ing. Jaime Allen-Monge, Ph.D

*Coordinador*

CENTRO DE TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA

Diagramación, diseño y control de calidad: Katherine Zúñiga Villaplana / Óscar Rodríguez Quintana

Boletín técnico: MEZCLAS ASFÁLTICAS CON RAP: PAVIMENTOS ASFÁLTICOS RECICLADOS / Enero 2019