

## REVISIÓN DE LAS TENDENCIAS INNOVADORAS EN LA ESTRUCTURACIÓN DE PAVIMENTOS COMO PARTE DEL DESARROLLO SUSTENTABLE

### REVIEW OF INNOVATIVE TRENDS IN THE STRUCTURING OF PAVING AS PART OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

Ortiz-Carrillo Á. A.<sup>1</sup>, Mora-Ortiz R. S. <sup>2\*</sup>, Magaña-Hernández F.<sup>2</sup>, Díaz- Alvarado S. A. <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Estudiante. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ingeniería y Arquitectura, carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez km. 1, Colonia La Esmeralda, Cunduacán, Tabasco, México. CP. 86690.

<sup>2</sup> Profesor-Investigador. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ingeniería y Arquitectura, carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez km. 1, Colonia La Esmeralda, Cunduacán, Tabasco, México. CP. 86690.

\*Autor de correspondencia: rene.mora@ujat.mx

#### RESUMEN

Actualmente a nivel mundial, muchas naciones están prestando atención a mejorar y optimizar el uso de materiales reciclados en el sector constructivo. El encarecimiento de las materias primas y el aumento de la conciencia ambiental han cobrado gran importancia a nivel mundial. En ingeniería de carreteras, se están utilizando materiales de desecho para el diseño y construcción de pavimentos. La ecología, la eficiencia energética, la rentabilidad y la reducción significativa del tiempo de construcción son los principales impulsores de esta

propuesta. Sin embargo, aspectos sociales y de legislación han impedido que este tipo de procedimientos se implanten con éxito en la mayoría de los países en desarrollo. En el presente artículo se analizan algunas de las principales tendencias en el aprovechamiento de materiales de desecho para el diseño y construcción de pavimentos.

**Palabras clave:** asfalto, concreto, pavimento, reciclaje, sustentable.

## ABSTRACT

Currently, worldwide, many nations are paying close attention to the improvement and optimization of the usage of recycled materials in the building sector. The increase in the raw materials and the increased environmental awareness have gained considerable importance on a global scale. In road engineering, the waste material is used for the design and construction of pavements. Ecology, energy efficiency, profitability and significant reduction of the construction time are the primary drivers of this proposal. However, social and legislative aspects have prevented these types of procedures are implemented successfully in most developing countries. In this article, we analyze some of the main trends in the use of waste materials for the design and construction of pavements.

**Keywords:** asphalt, concrete, pavement, recycling, sustainable.

## INTRODUCCIÓN

Mantener una adecuada red de carreteras es un requisito básico de infraestructura para lograr un crecimiento económico en una región ya que proporciona conectividad para áreas remotas, acceso a mercados, escuelas y hospitales, además de unir regiones para el comercio y la inversión. Las carreteras han desempeñado un papel importante en el desarrollo del transporte, a través de enlaces con aeropuertos, estaciones de ferrocarril y puertos marítimos [1].

Las infraestructuras de transporte terrestre y particularmente la infraestructura vial son fundamentales en el desarrollo económico y social. El nivel de calidad percibido por el usuario viene determinado, principalmente, por el pavimento. A nivel mundial se invierte

anualmente más de 400 mil millones de dólares en la construcción y el mantenimiento de pavimentos; tareas que aumentan en un 10% el impacto ambiental generado por la circulación de los vehículos [2].

Contar con un transporte sustentable es una prioridad para todas las naciones, ya que se solucionan las necesidades de movilidad de forma segura, sin impactar al medio ambiente y asegurando la factibilidad técnica y económica en los proyectos. La sustentabilidad es un concepto sobre el equilibrio del medio ambiente, la sociedad y la economía [3]. Se define como la capacidad de perdurar, refiriéndose al concepto de administración del medio ambiente y los recursos naturales para minimizar el impacto de las actividades humanas en el planeta Tierra. Su finalidad es que las generaciones futuras se beneficien de la tierra del mismo modo que lo hace la

actual [4].

Debido a que los recursos naturales utilizados en la construcción y rehabilitación de pavimentos se están agotando rápidamente, así como al surgimiento de una mayor conciencia de los problemas de sustentabilidad, los ingenieros a cargo de la toma de decisiones están buscando productos de pavimentación alternativos y métodos de construcción que brinden una larga vida útil y ahorren materiales y energía [5].

El pavimento es la capa constituida por uno o más materiales que se colocan sobre el terreno natural o nivelado, para aumentar su resistencia y servir para la circulación de personas o vehículos. Entre los materiales utilizados en la pavimentación urbana o industrial están: los suelos con mayor capacidad de carga, los materiales rocosos, el concreto y las mezclas asfálticas. Es importante implementar estrategias para encontrar

soluciones de pavimentos sustentables. Dichas estrategias deben tener en cuenta lograr una larga vida útil, la conservación de la energía, de los recursos naturales, el mantenimiento de la calidad del aire y el suministro de agua natural. Además de los pavimentos tradicionales de concreto y asfalto hoy en día existen otras opciones en pavimentación. Una de ellas son los pavimentos reciclados, estos consisten en pavimentos que se elaboran aprovechando el material que se obtiene de la demolición de otros pavimentos como materia prima. Este tipo de pavimentos está ganando reconocimiento rápidamente porque brinda opciones que afectan positivamente a las tres bases de la sustentabilidad: **ambiental, económica y social** [5].

## EL RECICLADO Y SU IMPACTO EN EL AMBIENTE

**El concreto.** El objetivo de utilizar material de pavimento reciclado es preservar los recursos naturales como lo son los agregados (grava y arena) además de satisfacer las necesidades económicas mediante la reducción del costo de la construcción y rehabilitación de carreteras. Sultan y Guo (2016) [6] evaluaron las características mecánicas y estructurales de materiales de pavimentos de asfalto reciclado (PAR) con el objetivo de utilizarlos en la construcción y rehabilitación de pavimentos de carreteras. El análisis mostró que el uso de pequeños porcentajes de cementos Portland mejora las características estructurales de los materiales asfálticos reciclados lo que les permite ser utilizados como estabilizadores para pavimentos viejos o rehabilitados, así como también para la

construcción y rehabilitación de pavimentos perpetuos. Con este tipo de material se consigue un gran ahorro en los costos de construcción además de importantes contribuciones al medio ambiente y preservación de los recursos naturales [6].

Debido a razones económicas y a la necesidad de conservación, ha habido un cambio creciente hacia el uso de pavimento de asfalto reciclado en la industria de la construcción del pavimento. En Egipto, la mayoría de las mezclas de asfalto Hot-Mix (AHM) se producen solo a partir de materiales vírgenes, aunque hay alrededor de cuatro millones de toneladas por año de materiales de asfalto recuperados, que no se usan. El pavimento flexible hecho de asfalto Hot-Mix con gránulos de pavimento de asfalto recuperado se usa cada vez más. Los resultados de laboratorio indican que cuando se diseña

correctamente, el asfalto mezclado con pavimento de asfalto reciclado, especialmente con una relación de reemplazo del 50 al 100 % proporciona un mejor rendimiento en comparación con los de la mezcla nueva de asfalto Hot-Mix convencional. La mezcla reciclada minimiza el impacto ambiental a través de la reducción del consumo de energía, mejora las propiedades mecánicas, la durabilidad y la resistencia a la extracción [7] [8]. El uso del material reciclado reduce significativamente la pérdida de estabilidad y la resistencia a la formación de baches para el aglutinante en asfalto Hot-Mix [9].

El agregado de concreto reciclado se produce triturando y tamizando adecuadamente los desechos demolidos para obtener el tamaño requerido de los agregados que sustituirán la necesidad de agregados vírgenes. Los beneficios económicos y ambientales del uso de

agregado de concreto reciclado de las actividades de construcción y demolición han quedado claros en los últimos años. El uso de agregado de concreto reciclado en la construcción de carreteras, especialmente en asfalto Hot-Mix, también contribuye en la reducción del consumo de agregados vírgenes como recursos naturales y la eliminación de las reservas de desechos de concreto [9].

En la División Académica de Ingeniería y Arquitectura, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, actualmente se está analizando el desempeño de morteros y concretos elaborados con sustitución parcial del agregado fino (arena) por *Residuos Sólidos de la Construcción y Demolición* (RCD). Es decir, los escombros producto de la demolición y/o renovación de estructuras elaboradas con mezclas de cemento se puede aprovechar para elaborar mezclas nuevas de mortero. Los morteros

elaborados con sustitución de la arena por RCD reciben el nombre de *morteros sustentables* [10].

La figura 1 muestra una comparación de las resistencias a la compresión simple de morteros sustentables (sustitución de arena por RCD en un 60 %) y morteros convencionales. Puede observarse que la resistencia a la compresión a las edades de 14 y 28 días es superior en los morteros sustentables. Lo anterior demuestra que el empleo de morteros sustentables en la construcción es viable desde el punto de vista económico y ecológico. El uso de materiales reciclados en la industria de la construcción se ha convertido en un método esencial para implementar el desarrollo sustentable en esta industria. Su uso contribuye al objetivo global del desarrollo sustentable a través de la protección del medio ambiente mediante el uso prudente de los recursos naturales

[10] [11].

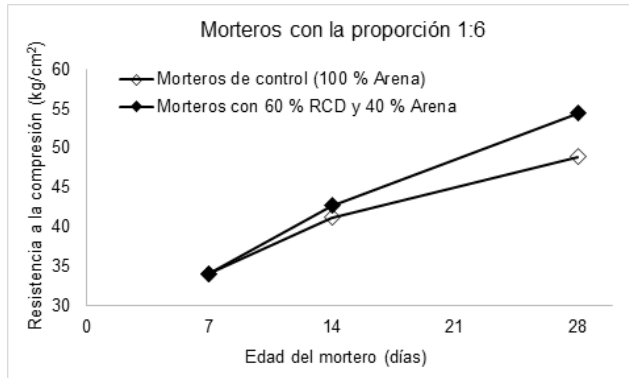


Figura. 1. Morteros convencionales vs morteros sustentables [10].

Sin embargo, a pesar de los beneficios, el progreso en el uso de materiales reciclados ha sido relativamente lento en muchos países. Varias barreras inhiben el uso de concreto reciclado en un grado variable en todo el mundo. La literatura ha proporcionado evidencia de que los efectos de estas barreras están influenciados por factores ambientales, culturales y técnicos que varían de un país a otro. En Grecia, por ejemplo, el uso de este material en la industria de la construcción es muy bajo debido a cuestiones legales, económicas, sociales

y técnicas [12].

**Bituminoso.** La diferencia en el costo de construcción de las carreteras de concreto y bituminosas se ha reducido considerablemente a causa del aumento repentino del costo del betún o alquitrán. En la India, las carreteras de cemento son preferidas que las carreteras bituminosas en los centros urbanos. Los caminos de concreto son usuarios potenciales de cemento. El comportamiento del concreto ya sea fresco o endurecido, depende básicamente del comportamiento de sus componentes y de la relación entre ellos, por lo tanto, obtener un concreto con ciertas propiedades depende fundamentalmente del diseño de la mezcla [13].

El método convencional para proporcionar superficies bituminosas en pavimentos flexibles requiere una cantidad significativa de energía para la

producción de aglutinante bituminoso a partir de petróleo crudo y la posterior producción de la mezcla en caliente. El reciclaje de mezcla caliente es el proceso en el que se recupera del asfalto los materiales del pavimento y se combinan con nuevos materiales para producir mezclas asfálticas en caliente. Cuando se diseñan correctamente, las mezclas recicladas pueden tener un rendimiento mejor o similar a las de las nuevas mezclas convencionales de asfalto de mezcla en caliente [1].

Los agentes de reciclaje o rejuvenecedores se han definido como materiales orgánicos con características químicas y físicas seleccionadas para restaurar las propiedades del asfalto envejecido a las especificaciones originales de dicho asfalto, es decir, cuando este asfalto virgen se tendió por primera vez cumplía con las normas de construcción del país en el que se

construyó (en el caso de México son las normas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes), con el paso de los años el asfalto se envejeció y para recuperarlo se levanta y se mezcla con agentes rejuvenecedores, estos últimos devuelven al asfalto viejo sus propiedades iniciales (asfalto virgen), cumpliendo nuevamente con las normas de construcción del país donde se encuentre para volver a ser tendido (estas normas no regulan el uso de los agentes de rejuvenecedores, solo del pavimento como producto final). Los agentes rejuvenecedores también se conocen como suavizantes, agentes de regeneración, modificadores, aceites fundentes, aceites extendedores y aceites aromáticos. La elección del grado del agente de reciclaje dependerá de la cantidad y dureza del asfalto en el pavimento envejecido [1].

Se han realizado estudios de laboratorio



sobre mezclas de asfalto con material reciclado y agentes rejuvenecedores y se ha comparado su rendimiento con mezclas de asfalto virgen. Los resultados indican que las mezclas de asfalto con material reciclado y el agente rejuvenecedor proporcionan un mejor rendimiento en comparación con las mezclas vírgenes [1].

En Nigeria, la restauración de la red de carreteras no está dando los resultados esperados, ya que la mayor parte de la red permanece en estado deplorable. La reconstrucción total y las superposiciones que se están empleando en la actualidad son costosas, lentas, derrochadoras y causan considerables inconvenientes para el usuario de la carretera. El reciclaje de asfalto en el pavimento es una herramienta y una técnica comprobadas que podrían rescatar un proyecto. La ecología, la eficiencia

energética, la rentabilidad y la reducción significativa del tiempo de construcción son los principales impulsores de esta propuesta. Los proyectos en los que dichos materiales y métodos se emplearon para la restauración de carreteras en los países desarrollados han sido muy impresionantes y alentadores [14].

El aglutinante envejecido es el principal obstáculo para aumentar el uso o el pavimento de asfalto recuperado en la producción de pavimentos de asfalto. El aglutinante reciclado es mucho más rígido y, por lo tanto, se considera que las mezclas de alto contenido de este material son susceptibles a fatiga y fallas por fisura térmica. La elección apropiada del rejuvenecedor puede reducir la viscosidad del aglutinante para lograr la característica deseada de la mezcla y recuperar las propiedades de comportamiento necesarias del

aglutinante envejecido. Se han evaluado rejuvenecedores de diferente origen como: extracto aromático, aceite residual de motor, aceite de resina, aceite orgánico, aceite vegetal residual y grasa vegetal residual, encontrando que todos los rejuvenecedores superan el requisito mínimo de fatiga [15].

**Reciclado en frío.** Los métodos de rehabilitación y reconstrucción de pavimentos con reciclado en frío son alternativas que pueden reducir eficazmente las altas tensiones y los desechos producidos por las estrategias convencionales de pavimentación. El reciclaje en frío es una técnica de rehabilitación sustentable adecuada para climas fríos. Es importante realizar una investigación más exhaustiva de las fatigas relacionadas con la carga, como la podredumbre y el agrietamiento por fatiga [16]

Recientemente se ha prestado atención

al uso de procesos alternativos para reducir la mezcla y la temperatura de compactación sin afectar adversamente el producto final del pavimento. El asfalto Warm Mix es una solución emergente para reducir la temperatura de producción, mejorar la compactación y reducir la emisión de contaminantes. Se ha investigado el impacto del uso de aditivos comerciales como el Sasobit para la reducción de la temperatura de las mezclas elaboradas con agregado virgen y pavimento asfáltico recuperado. Los resultados mostraron que al agregar Sasobit con un 2% de mezcla de pavimento asfáltico recuperado, el rendimiento mejora en un 20%. Por otra parte, los aditivos de nanomateriales no mostraron ninguna mejora significativa [8].

Se ha demostrado que la reutilización de residuos de construcción y demolición, así como el reciclado en caliente de

mezclas asfálticas es una excelente manera de reducir la necesidad de utilizar materiales vírgenes y es una opción para reutilizar los llamados residuos de la construcción y no requieren grandes inversiones o equipos sofisticados. Por lo tanto, se cree que las estructuras de pavimento duraderas y sustentables también se pueden construir muy bien en los países en desarrollo. Sin embargo, es importante que el gobierno desarrolle políticas activas para promover y estimular el reciclaje de materiales de construcción [17].

**Pavimentos permeables.** Los pavimentos permeables son uno de los dispositivos de tratamiento del sistema de drenaje urbano sostenible que se utiliza en todo el mundo para el aprovechamiento y tratamiento de las aguas de lluvia. Los pavimentos permeables están específicamente

diseñados para promover la infiltración de aguas pluviales a través del pavimento para posteriormente permitir que ésta se infiltre por el terreno o bien sea captada y retenida en capas subsuperficiales para su posterior reutilización o evacuación [18].

Hay varios tipos de pavimentos permeables usados típicamente en Europa, incluyendo adoquines de concreto con juntas o aberturas anchas, y adoquines de concreto porosos, con o sin juntas anchas. Estos generalmente se fabrican como bloques y se conocen como adoquines de enclavamiento de concreto permeables. Los adoquines de rejilla de concreto y plástico tienen más espacios vacíos abiertos para promover la infiltración. Las aguas pluviales pueden infiltrarse a través de las grandes brechas en estos adoquines que generalmente están llenos de grava, o tierra vegetal plantada con pasto. Las

tasas de infiltración de los sistemas recién instalados han demostrado ser muy altas. Sin embargo, se ha demostrado que disminuye significativamente con el tiempo debido a la colmatación [18].

El uso de concreto permeable es una práctica relativamente nueva en el oeste de los Estados Unidos. Se ha utilizado ampliamente en climas húmedos como Florida durante casi tres décadas. A principios de la presente década, el concreto permeable comenzó a aparecer en los estacionamientos y callejones recién construidos en los mercados de clima frío en Indiana, Ohio, Illinois y Wisconsin [19]. El concreto permeable trae consigo una serie de recompensas sustentables. Su uso ayuda a recargar el acuífero subterráneo y reduce el impacto del agua de lluvia al disminuir sustancialmente el escurrimiento superficial el cual provoca

encharcamientos. El pavimento permeable puede manejar un gran volumen de agua, absorbiendo de tres a 17 galones por pie cuadrado por minuto, dependiendo del diseño de la mezcla de pavimento. Estacionamientos, e incluso callejones, pueden convertirse en gestores de sistemas pluviales. En Chicago, el pavimento permeable se está instalando aproximadamente en dos mil millas de callejones para el manejo de los escurrimientos superficiales urbanos [19].

## NUEVOS MATERIALES

**Vidrio triturado.** En Sudáfrica, se evalúa una nueva mezcla de concreto asfáltico que utiliza vidrio triturado como material de reemplazo de un agregado natural. El objetivo final es encontrar un asfalto modificado con características de rendimiento comparativas con el asfalto convencional, comúnmente utilizado en las carreteras de Sudáfrica. Se evaluó

una mezcla con un contenido de vidrio de 5.1 %, similar al contenido de aglutinante óptimo de 5.0 % de la mezcla de referencia. Los resultados indican que la mezcla de asfalto de vidrio cumple con los criterios que marca la ley de Sudáfrica, por lo que el diseño de la mezcla es aceptable. Los resultados de las pruebas relacionadas con el rendimiento indicaron que las propiedades de resistencia a la tracción y durabilidad de la mezcla de asfalto de vidrio son comparables a la mezcla de referencia [20].

**Poliestireno.** El desecho de materiales no deseados se está convirtiendo en un tema vital en las tendencias de la ingeniería contemporánea, ya que tiene una influencia negativa en el medio ambiente donde se descarta. El poliestireno es uno de los materiales ampliamente utilizados en aplicaciones industriales como material de embalaje y

construcción. La recolección y la utilización de este material en mezclas de asfalto ha sido evaluada en las proporciones de 0, 5, 10 y 15 %, adicionado al betún o alquitrán. Se ha encontrado que el aumento de la relación de poliestireno en el asfalto tiene un impacto directo en las propiedades del betún al disminuir la penetración, la ductilidad y el aumento del ablandamiento, el destello y los puntos de combustión. El asfalto modificado se puede usar en climas cálidos para diferentes propósitos de construcción, como materiales aislantes (impermeables) para sótanos, muros de contención y techos o como material de pavimento en pisos de garajes, estacionamientos, aceras y parques [21].

**Lignina.** La mayoría de las carreteras están hechas de rocas y grava junto con asfalto, este último, como bien se sabe, es un producto derivado del petróleo.

Una opción para construir carreteras verdes es la lignina, el material que se encuentra en las plantas leñosas. Representa aproximadamente el 30 % del biomaterial del planeta y generalmente, después de la extracción de azúcares, celulosa y otros materiales útiles, la lignina sobrante se desecha o se quema. Desde una perspectiva química, la lignina y el asfalto tienen algunas cosas en común. Sin embargo, mezclar la lignina no tratada con el asfalto no funciona. La lignina es relativamente hidrófila y forma grumos no mezclables; algunas modificaciones químicas la han hecho más hidrofóbica, lo que permite mezclarla con el asfalto. Investigadores han encontrado que pueden reemplazar la mitad del asfalto en el material de pavimentación con lignina modificada y el pavimento no se agrieta ni se abolla [22].

**Suelos ligeros.** El reciclaje de suelos pobres es muy importante cuando los

materiales de construcción de buena calidad son limitados. Se ha investigado las propiedades del suelo tratado con peso liviano, al utilizarlo como una capa de subbase para los pavimentos. Basado en la vida útil del pavimento, el suelo de dragado reciclado y estabilizado con espuma de aire podría ser utilizado como un material de pavimento sostenible [23].

## ENERGÍA

**Biomasa.** La producción de materiales de construcción consume mucha energía y requiere grandes cantidades de combustibles fósiles. El asfalto es el principal material de pavimentación de carreteras en Europa y se produce principalmente en fábricas estacionarias de asfalto de mezcla discontinua. El proceso de producción que requiere la mayor cantidad de energía es el calentamiento y secado del agregado, en el que se quema gas natural, gasolina o gas LP en un secador rotatorio de

combustión directa. Reemplazar esta fuente de energía con una más sostenible presenta varios desafíos técnicos y económicos, ya que se requieren altas temperaturas, tiempos de arranque cortos y variaciones estacionales de producción.

El uso de la biomasa como combustible de proceso primario es una opción sustentable, considerando la gasificación de paja y astillas de madera y la combustión directa de pellets de madera. Los desafíos de tener una producción estacional variable pueden resolverse mediante la integración de la unidad de producción al sistema de utilidad. Los resultados muestran la viabilidad económica y técnica del uso de biomasa para la calefacción de procesos en la fábrica de asfalto [24].

**Pavimento colector de energía.** La recolección de energía solar utilizando pavimentos de asfalto tiene una gran

importancia en el escenario energético actual. Los pavimentos de asfalto sometidos a radiación solar pueden alcanzar temperaturas de hasta 70 °C debido a su excelente propiedad de absorción de calor. Muchos parámetros de trabajo, como el diámetro, el espaciado, la profundidad, la disposición de la tubería, así como la velocidad de flujo, influyen en el rendimiento del colector solar de asfalto. La literatura existente sobre la extracción de energía térmica de los pavimentos de asfalto se basa en muestras de laboratorio a pequeña escala y simulaciones numéricas. Para diseñar un colector solar de asfalto eficiente debe haber una compensación entre la estabilidad térmica y estructural del pavimento, de modo que el calor máximo se pueda absorber sin daños estructurales debido a la condición de carga externa [25].

## IMPACTO ECONÓMICO

Los beneficios del uso de materiales reciclados en pavimentos de carreteras se han evaluado cuantitativamente mediante la realización del análisis del ciclo de vida y de costos en pavimentos compuestos por materiales convencionales y reciclados. Un ejemplo de este análisis fue el realizado por Lee et al., (2010) [26] para un proyecto de construcción de carreteras en Wisconsin, Estados Unidos. Los resultados del análisis indican que el uso de materiales reciclados en las capas de base y subbase de un pavimento puede reducir el potencial de calentamiento global en un 20 %, el consumo de energía en un 16 %, el consumo de agua en un 11 % y la generación de residuos peligrosos en un 11 %, a la vez que prolonga la vida útil del pavimento. Además, el uso de materiales reciclados en las capas de base y subbase puede resultar en un

ahorro de costos del ciclo de vida del 21 %. Los ahorros son aún mayores si se consideran los costos de evitación de vertederos para los materiales reciclados incorporados en el pavimento. La extrapolación de los beneficios a las condiciones en todo el país indica que los cambios modestos en el diseño del pavimento para incorporar materiales reciclados pueden contribuir sustancialmente a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero [26].

## IMPACTO SOCIAL

La dimensión social es uno de los tres pilares de la sustentabilidad, y varios parámetros sociales (seguridad, retraso del tránsito y salud, entre otros) se encuentran en el límite de los otros dos pilares: el medio ambiente y la economía. La ausencia de la dimensión social de cualquier análisis o proyecto no refleja una visión redondeada de todos los



impactos y, por lo tanto, puede sesgar el proceso de toma de decisiones. Por esta razón, cualquier esfuerzo para llevar a cabo un análisis integral de pavimentos debe incluir el aspecto social. Sin embargo, es intrincado en términos de definición de objetivos, alcance, recopilación y cuantificación de datos, y lo más importante en términos de lograr un análisis imparcial de los hallazgos. Algunos parámetros como la salud (en términos de emisiones, por ejemplo) y la seguridad (tasas de accidentes y fatalidades) se pueden cuantificar fácilmente. Otros, sin embargo, requieren una asignación semicuantitativa o descriptiva ya que no hay una métrica universal clara disponible. Estos incluyen parámetros tales como derechos humanos, creación de empleo y apoyo de proveedores locales. Las condiciones físicas de trabajo de los empleados de la construcción de pavimentos son un

ejemplo de ello. Las condiciones físicas se pueden cuantificar en términos de exposición a las emisiones y en parte se describen en términos de comodidad física. Los derechos y los impactos relacionados con la comunidad se pueden evaluar simplemente en términos de preguntas mediante la asignación de un cierto peso en una escala adecuada [27].

En un estudio prospectivo a 30 años se concluyó que, debido al encarecimiento de los insumos, así como a las preocupaciones ambientales, los materiales elaborados a partir del reciclaje desempeñarán un papel principal. Además, las tecnologías que permiten monitorear de manera continua el estado del pavimento se usarán para un rango mayor. La introducción de sensores en la red de pavimento llevará a la construcción de caminos inteligentes, mientras que la expansión

de la tecnología de nanomateriales mejorará la durabilidad y la fiabilidad de la construcción de pavimentos de carreteras [28].

## CONCLUSIONES

Las infraestructuras de transporte terrestre y particularmente la infraestructura vial es fundamental en el desarrollo económico y social de cualquier sociedad. La construcción de pavimentos modernos y duraderos de asfalto y cemento requiere materiales de alta calidad y tecnologías adecuadas que tengan en cuenta las preocupaciones de sustentabilidad relacionadas con la protección ambiental, mitigación y compensación de los efectos de la construcción de carreteras en aguas superficiales, aguas subterráneas, suelo, aire, vida silvestre, paisaje, vibración y ruido.

Los materiales reciclados han

demostrado cumplir con los estándares de calidad exigidos por la industria de la construcción. La implementación de éstos como materia prima en la elaboración de pavimentos propicia ahorros considerables en los costos de construcción a la vez que contribuyen a mejorar el medio ambiente y la preservación de los recursos naturales. Sin embargo, a pesar de sus beneficios el uso formal de estos materiales en los países en desarrollo se ha visto detenido principalmente por factores culturales, ambientales y de legislación. En relación con este último aspecto, hoy en día no existe en activo un organismo regulador a nivel mundial que establezca los requerimientos mínimos necesarios que deben de satisfacer los materiales para ser reutilizados. Sin duda la creación de dicho organismo proporcionaría un marco legal importante para que los gobiernos implementasen en sus respectivos reglamentos de construcción

la utilización de los materiales reciclados. Los primeros pasos hacia la creación de dicho organismo los está dando ASTM International, ya que a través de varios comités técnicos como el C09 sobre el concreto y agregados del concreto, así como el D04 sobre materiales para calles y pavimentos, está realizando un esfuerzo para desarrollar normas que regulen los procedimientos de ensayo para validar la calidad de los materiales a reciclar [29].

Una de las directrices del reciclaje es aprovechar el material que se tiene en el sitio, para lo cual es necesario primeramente realizar un estudio exhaustivo y riguroso del material que se desea reciclar, a fin de definir sus propiedades y el grado en el que se le aprovechará. Por esta razón, las investigaciones que se han realizado giran en torno a un solo material y no suelen comparar distintos materiales.

Lamentablemente, los resultados de estas investigaciones no se pueden extrapolar del todo a otros lugares, es decir, no se puede asegurar que determinado material es el mejor para una aplicación en particular ya que el rendimiento de estos materiales depende de la calidad de los elementos que los constituyen, del grado de alteración que posean y de las condiciones propias del sitio como lo son la temperatura ambiente, la intensidad del paso vehicular, etc.

Por todo lo anterior, además de continuar trabajando para demostrar los beneficios técnicos de la reutilización de los materiales de desecho como materia prima en la industria de la construcción, es imprescindible desarrollar y promover estrategias legales, administrativas y tributarias que favorezcan y estimulen la reutilización de materiales de desecho.

## REFERENCIAS

- Transportation Science and Technology. 5(3) 200-209.
- [1] Pradyumna T., Mittal A. y Jain P. (2013). Characterization of reclaimed asphalt pavement (rap) for use in bituminous road construction. *Procedia, Social and Behavioral Sciences*. 104 1149-1157.
- [2] Torres-Machi C., Yepes V., Chamorro A. y Pellicer, E. (2014). Current models and practices of economic and environmental evaluation for sustainable network-level pavement management. *Journal of Construction*. 13 (2) 49-56.
- [3] Mendoza J. (2014). Criterios de sustentabilidad para carreteras en México. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 392. Sanfandila, Querétaro.
- [4] Saboori A., Abdelrahman M. y Waldenmaier A. (2014). Tools for Sustainability Management in Pavement Industry. *Journal of Frontiers in Construction Engineering*. 3(3) 55-71.
- [5] Abdo F. y Shepherd D. (2010). Innovative sustainable pavement solutions. Concrete Sustainability Conference. National Ready Mixed Concrete Association. Disponible:<https://www.nrmca.org/ctf/2010CSCProceedings/documents/Abdo%20Presentation%204-13-10.pdf>.
- [6] Sultan S.A. y Guo Z. (2016). Evaluating the performance of sustainable perpetual pavements using recycled asphalt pavement in China. *International Journal of*
- [7] Abu A. y Elmohr A. (2015). Characterization of recycled asphalt pavement (RAP) for use in flexible pavement. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*. 8 (2) 233-248.
- [8] MAKGOKA, A., GROBLER, J.E., MARAIS, H. y BAKKER, D. (2014). Environmentally sustainable use of recycled Asphalt at or Tambo International Airport. Proceedings of the 33rd Southern African Transport Conference (SATC 2014). ISBN Number: 978-1-920017-61-3.
- [9] Mostafa A. (2016). Development Of Environmentally Sustainable Warm Mix Asphalt Using Sasobit And Nanomaterials. *IOSR Journal of Engineering, IOSRJEN*. 6 (2) 44-58.
- [10] Mora-Ortiz, R.S., Díaz-Alvarado, S.A. y Magaña-Hernandez, F. (2018). Análisis del desempeño de morteros y concretos sustentables. Artículo en preparación.
- [11] Méndez de los Santos, N., Rodríguez Jiménez, C., Cruz Gómez N. y Laines Canepa, J.R. (2010). Los escombros como agregados en la industria de la construcción. *Kuxulkab. DACB. UJAT*. Vol. XVI, Número 30.
- [12] Marantzidis I. y Gidado K. (2011) The maximisation of the use of reclaimed asphalt pavement (RAP) in the Greek construction industry In: Egbu, C. and Lou,

- E.C.W. (Eds.) Procs 27th Annual ARCOM Conference, 5-7 September 2011, Bristol, UK, Association of Researchers in Construction Management. 1125-1134.
- [13] Mukherjee S. y Vesmawala G. (2017). Experimental studies of sustainable cement concrete pavement. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, IOSR-JMCE. 14(3) 01-09.
- [14] Oke O., Aribisala J., Ogundipe O. y Akinkurolere O. (2013). Recycling of asphalt pavement for accelerated and sustainable road development in Nigeria. *International Journal of Scientific & Technology Research*. 2(7) 92-98.
- [15] Zaumanis M., Mallick R. y Frank R. (2013). Use of rejuvenators for production of sustainable high content rap hot mix asphalt. The XXVIII International Baltic Road Conference. Vilnius, Lithuania. 01-10.
- [16] Kang-Won L., Mueller M. y Singh A. (2014). Cold In-place recycling as a sustainable pavement practice. *Journal of Civil Engineering and Architecture*. 8(6) 680-692.
- [17] Molenaar A. (2013). Durable and sustainable road constructions for developing countries. *Procedia Engineering*. 54 69-81.
- [18] Boogaard, F., Wentink R., Vorenhout M. y de Beer J. (2016). Implementation of Sustainable Urban Drainage Systems to Preserve Cultural Heritage. *Conservation and Management of Archaeological Sites*. 18 (1-3) 328-341.
- [19] Scott P. y Bowers J. (2009). A sustainable pavement alternative: Use of pervious concrete is emerging in cold climates. *CE NEWS for the business of civil engineering*.  
<https://psomas.com/wp-content/uploads/2013/08/Sustainable-Pavement-AlternativeCE-News-Scott-Rocke-and-Jonathan-Bowers-January-2009.pdf>.
- [20] Anochie-Boateng J. y George T. (2016). Use of waste crushed glass for the production of hot-mix asphalt. *Sustainable Constructions Materials & Technologies*, SCMT4. Las Vegas, USA.
- [21] Baker M., Abendeh R., Abu-Salem Z. y Khedaywi T. (2016). Production of sustainable asphalt mixes using recycled polystyrene. *International Journal of Applied Environmental Sciences*. 11(1) 183-192.
- [22] Bourzac K. (2015). Inner Workings: Paving with plants. *PNAS*. 112(38) 11743-11744.
- [23] Viet H. y Park D. (2016). Lightweight Treated Soil as a Potential Sustainable Pavement Material. *Journal of Performance Constructed Facilities*. 30(1). C4014009-1-C4014009-7.
- [24] Bühler F., Nguyen T. y Elmegaard B. (2016). Sustainable production of asphalt using biomass as primary process fuel. *Chemical Engineering Transactions*. 52 685-690.

- [25] Jinshah B.S. y Ajith K.R. (2014). Structural and Thermal Analysis of Asphalt Solar Collector Using Finite Element Method. Journal of Energy. Volume 2014, Article ID 602087, 9 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/602087>.
- [26] Lee J., Edil T., Tinjum J. y Benson C. (2010). Quantitative Assessment of Environmental and Economic Benefits of Recycled Materials in Highway Construction. Journal of the Transportation Research Board. (2158) p 138-142.
- [27] Hamdar Y., Chehab G. y Srour I. (2016). Life-cycle evaluation of pavements: a critical review. Journal of Engineering Science and Technology Review. 9(6) 12-26.
- [28] Radziszewski, P., Nazarko, J., Vilutiene, T., Dębkowska, K., Ejdys, J., Gudanowska, A., Halicka, K., Kilon, K., Kononiuk, A., Kowalski, K., Król, J., Nazarko, Ł., Sarnowski, M. (2016). Future trends in road pavement technologies development in the context of environmental protection. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. 11(2) 160-168.
- [29] Clauson, D. (2015). Infraestructura civil más ecológica. ASTM International. Magazines & Newsletters. <https://>